Ueber den

Farben- und Temperatur-Sinn

mit besonderer Rücksicht auf

Farbenblindheit.

Von

W. Preyer
in Jena.



Mit 1 Tafel in Farbendruck.

Separatabdruck aus Pflüger's Archiv f. d. ges. Physiologie Bd. XXV.

Bonn,
Verlag von Emil Strauss.
1881.

Ueber den

Farben- und Temperatur-Sinn

mit besonderer Rücksicht auf

Farbenblindheit.

Von

W. Preyer
in Jena.

Mit 1 Tafel in Farbendruck.

Separatabdruck aus Pflüger's Archiv f. d. ges. Physiologie Bd. XXV.

Bonn,
Verlag von Emil Strauss.
1881.

I. Geschichte der Young'schen Hypothese bis 1860. — II. Darstellung der Farbenblindheit dieser Lehre zufolge. — III. Kritik der Hering'schen Hypothese. — IV. Grundlagen einer neuen Theorie der Licht- und Farben-Empfindungen. — V. Die Empfindungen der Haut und Netzhaut verglichen. — VI. Die Hypothese.

I. Geschichte der Young'schen Hypothese bis 1860.

§ 1. Thomas Young's Begründung derselben.

Newton warf bekanntlich in Erwägung der Dauer der durch das Licht im Hintergrunde des Auges erzeugten Bewegungen die Frage auf, ob dieselben vibratorischer Art seien und ob nicht die brechbarsten Strahlen die kürzesten Schwingungen, die am wenigsten brechbaren die längsten erregen und die Harmonie und Disharmonie der Farben von den Verhältnissen der durch die Fasern des Sehnerven in das Gehirn fortgepflanzten Schwingungen herrühre, wie die Harmonie und Disharmonie der Klänge von den Verhältnissen der Luftschwingungen? (*Optice* Ausg. v. Clarke 1740. *Qu.* 13. 14. 16.)

Hierzu macht Thomas Young, welcher mehrere ähnliche physiologische Aeusserungen Newtons über die Farbenperception zusammenstellte, am 12. November 1801 (*Phil. Trans.* 1802, I, S. 20—21) ein Scholion. In demselben heisst es:

Da aus dem von Newton angegebenen Grunde die Bewegung der Retina wahrscheinlich vibratorischer Art sei, müsse die Häufigkeit der Schwingungen abhängig sein von der Beschaffenheit dieses

Gebildes. „Weil es nun fast unmöglich gedacht werden kann, dass jeder empfindende Punct der Netzhaut eine unendlich grosse Anzahl von Theilchen enthalte, von denen jedes tauglich sein soll, in vollkommener Uebereinstimmung mit jeder möglichen Undulation zu schwingen, so ist es nöthig, anzunehmen, ihre Anzahl sei beschränkt, z. B. auf die drei Hauptfarben Roth, Gelb und Blau, deren Undulationen der Grösse nach nahezu wie die Zahlen 8, 7 und 6 sich verhalten, und dass jedes Theilchen in grössere oder geringere Bewegung versetzt werden kann von Undulationen, die mehr oder weniger von einer vollkommenen Prime abweichen; z. B. werden die Undulationen des grünen Lichts, welche nahezu im Verhältniss von $6^1/_2$ stehen, gleichmässig die mit Gelb und mit Blau im Einklang befindlichen Theilchen afficiren und denselben Effect bedingen, wie Licht, welches aus jenen zwei Arten zusammengesetzt ist: und jede empfindliche Faser des Nerven kann aus drei Theilen bestehen, einem für jede Hauptfarbe."

Im weiteren Verlaufe seiner Abhandlung (S. 38 und 39) macht Young die Angabe, der ganze Umfang des Spectrum betrage etwa eine grosse Sexte und wiederholt, dass die Wellenlängen des Roth, Gelb und Blau sich wie die Zahlen 8, 7 und 6 verhielten, so dass das Intervall vom Roth zum Blau einer Quarte entspreche. Die rothe Grenze des Spectrum lag nämlich für Young noch vor der Fraunhofer'schen Linie *C*. Erstaunlich genau sind jedoch einige seiner Berechnungen für die absolute Schwingungsgeschwindigkeit der einzelnen ihm bekannten Spectralfarben, die er mit Zugrundelegung der Annahme fand, dass das Licht in $8^1/_8$ Minuten 500,000,000,000 (Engl.) Fuss zurücklegt. So findet er die Frequenz für Grün zu 584 Billion in 1 Secunde, was beiläufig mit meinen directen Bestimmungen für das reinste Grün mittlerer Lichtstärke sehr gut übereinstimmt (vergl. § 25), und er bemerkt, dass die Schwingungen einer Saite, welche das eingestrichene *c* gibt, wenn dieselbe 40mal nacheinander halbirt würde, grüngelbes Licht geben müssten, da dessen Schwingungszahl durch c^{41} ausgedrückt werde, das äusserste Roth würde a^{40}, das Blau d^{41} entsprechen.

In einer wenig späteren Arbeit (*Account of some Cases of the production of colours. Phil. Trans.* 1802. II. S. 395) wird die Annahme von den Grundfarben modificirt. Young schreibt: „Es ist nöthig, die Annahme, welche ich bezüglich der Verhältnisse der

sympathetischen Fasern der Netzhaut in der letzten Abhandlung aufstellte, zu modificiren, und zwar Roth, Grün und Violett zu setzen, statt Roth, Gelb und Blau, und die Zahlen 7, 6 und 5 statt 8, 7 und 6.“

Es waren theils Wollastons (am 24. Juni 1802 vorgetragene und in demselben Bande der *Philosophical Transactions* veröffentlichte) Beobachtungen über das prismatische Spectrum, theils von Young selbst angestellte Untersuchungen über die Farben dünner Blättchen, welche diese bereits am 1. Juli 1802 der *Royal Society* vorgetragene Modification der ursprünglichen Hypothese bedingten, ohne natürlich irgend dazu zu zwingen. Denn es war damals ziemlich gleichgültig, welche drei und ob überhaupt drei Grundfarben gewählt wurden. Nur die Idee physiologischer Grundfarben, d. h. specifisch verschiedener für gewisse Farben empfindlicher Nervenfasern, ist unverändert seit 1801 bis heute in der Young'schen Fassung aufrecht erhalten worden.

Später hat Young in seinen *Lectures on natural philosophy and the mechanical arts* (London 1807. 4⁰. 2 Bde.), in welchen auch die beiden genannten Abhandlungen (die erwähnten Stellen II, S. 617, 618, 637, 638) unverändert abgedruckt sind, sich etwas ausführlicher ausgesprochen. Er schreibt (I, S. 439 *on physical optics*) von den prismatischen Farben:

„Es ist gewiss, dass die vollen (*perfect*) Empfindungen des Gelb und des Blau hervorgebracht werden bezüglich durch Mischungen von rothem und grünem, und von grünem und violettem Licht, und es ist begründet, zu vermuthen, dass jene Empfindungen stets zusammengesetzt sind aus den vereinigten Einzelempfindungen: wenigstens vereinfacht diese Annahme die Theorie der Farben. Sie kann daher mit Vortheil beibehalten werden, bis sie als unvereinbar mit irgend einer Erscheinung erfunden werden sollte; und wir dürfen weisses Licht als zusammengesetzt betrachten aus einem Gemisch von nur Roth, Grün und Violett in dem Verhältniss von ungefähr zwei Theilen Roth, vier Grün und einem Violett mit Rücksicht auf die Quantität oder Intensität der hervorgebrachten Empfindungen.“

„Mischen wir in passenden Verhältnissen irgend welche Stoffe, welche diese Farben in ihrer grössten Reinheit zeigen, so erscheint das Gemisch bei genügender Lichtstärke vollkommen weiss; bei geringerer Lichtstärke aber ist das Gemisch grau, oder von dem

Ton der durch eine Vereinigung von Weiss und Schwarz entsteht, indem schwarze Körper solche sind, welche weisses Licht nur zu einem sehr kleinen Theil reflectiren. Aus demselben Grunde geben rothe und grüne Körper gemischt gewöhnlich mehr eine braune als gelbe Farbe, und viele gelbe Farben werden sehr dick aufgetragen oder mit Schwarz gemischt, braun. Die Empfindungen verschiedener Lichtarten können auch in noch befriedigenderer Weise vereinigt werden durch Bemalen einer Kreisscheibe mit verschiedenen Farben in jeder wünschenswerthen Art und so schnelles Umdrehen derselben, dass das Ganze das Aussehen einer einzigen Färbung gewinnt oder einer Vereinigung von Färbungen, die aus der Mischung der Farben resultirt."

„Mittelst drei einfacher Empfindungen mit ihren Combinationen erhalten wir sieben primitive Unterscheidungen von Farben; aber die verschiedenen Verhältnisse, in denen sie combinirt werden können, geben eine Manigfaltigkeit von Färbungen (*tints*) über jede Berechnung hinaus. Sind die drei einfachen Empfindungen Roth, Grün und Violett, so sind die drei binären Combinationen Gelb, aus Roth und Grün, Carmoisin (*crimson*) aus Roth und Violett; und Blau aus Grün und Violett, und die siebente der Reihe ist weisses Licht, zusammengesetzt aus allen dreien. Jedoch ist das so durch Vereinigen sämmtlicher grünen und violetten Strahlen erzeugte Blau, nicht das Blau des Spectrum, denn vier Theile Grün und ein Theil Violett geben ein sehr wenig vom Grün abweichendes Blau, während das Blau des Spectrum ebensoviel Violett wie Grün zu enthalten scheint: und aus diesem Grunde geben Roth und Blau gewöhnlich ein Purpur, das seinen Ton (*hue*) dem Ueberwiegen des Violett verdankt."

Hierdurch ist die Grundlage der Theorie gegeben. Drei Grundempfindungen, Roth, Grün, Violett, nicht drei sogenannte objective Farben oder Nervenerregungen werden angenommen, und alle anderen Farben als aus den Grundempfindungen in verschiedenen Verhältnissen zusammengesetzt aufgefasst. Doch ist unverständlich, worauf Young die Meinung stützt, in dem reinen spectralen Blau scheine ebensoviel Violett wie Grün enthalten zu sein, da doch Niemand im reinen Blau die geringste Spur von Grün oder von Violett empfindet.

Ausser den angeführten Stellen finde ich in Youngs Werken nur noch eine hierhergehörige Notiz. Er meint (II, S. 315), Dal-

tons Erklärung seiner Farbenblindheit durch blaue Färbung des Glaskörpers verwerfend, es sei viel einfacher, eine Abwesenheit oder Lähmung der die Empfindungen des Roth vermittelnden Retinafasern (*fibres of the retina, which are calculated to perceive red*) anzunehmen; diese Annahme erkläre alle von Dalton an sich beobachteten Farbentäuschungen, mit Ausnahme des Bläulichwerdens grüner Farbstoffe bei Kerzenlicht. Die letztere Angabe steht nicht im Widerspruch zu dem jedermann bekannten Grünwerden vieler grünlich-blauen Farbstoffe bei Lampen- oder Kerzen-Licht, welches von dem geringeren Quantum blauen Lichtes in diesen Lichtquellen herrührt. Denn Dalton empfand (wie sich weiter unten zeigen wird) nur Gelb und Blau, es konnte daher im gelben Lichte das Blau durch Contrast gehoben werden, wenn bläulichgrüne Pigmente betrachtet wurden.

§ 2. Arthur Schopenhauer über die Farben.

Ohne, wie es scheint, von Youngs Untersuchungen etwas zu wissen, hat im Jahre 1816 Arthur Schopenhauer eine Ansicht über die Betheiligung der Netzhaut bei Farbenempfindungen aufgestellt, welche an die Young'sche Annahme erinnert. So abgeschmackt und unwissend auch in physikalischen und namentlich optischen Dingen der grosse Philosoph war — konnte er doch ausrufen: „Man zeige mir eine Wellenlänge!“ — darin hat er ein Fünkchen Wahres gefunden, dass er behauptet, Weiss sei die volle, die Farbe eine getheilte Thätigkeit der Netzhaut. Aber es gilt von Schopenhauer genau das, was er selbst einmal von Newton schreibt: „Man kann also zu Gunsten Newtons weiter nichts sagen, als dass er zufällig einen der Wahrheit nahe kommenden Ausspruch gethan hat“ (Schopenhauer, Ueber das Sehn und die Farben, Leipzig 1816. S. 63). Uebrigens hat Czermak die Anklänge der Schopenhauer'schen Farbentheorie an die Youngs ausführlich abgehandelt (Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. in Wien. 2. Abth. Juli-Heft 1870), und zwar mit Zugrundelegung der dritten Auflage vom Jahre 1870. Ich habe jedoch in der ersten Auflage von 1816 und in der zweiten vom Jahre 1854 das Wesentliche über die „qualitativ getheilte Thätigkeit der Retina“ vorgefunden. Der berühmte Philosoph hat in der That den Grundgedanken der Young'schen Hypothese, ohne freilich im mindesten in deren Entwickelung einzugreifen und ohne sie im Geringsten zu beeinflussen,

15 Jahre nachdem er ausgesprochen war, gleichfalls, wenn auch in wenig wissenschaftlicher Form selbständig ausgesprochen.

§ 3. Helmholtz spricht sich auf Grund seiner Untersuchungen gegen die Young'sche Idee aus.

Der erste, welcher experimentell und mit wissenschaftlicher Kritik auf Youngs Angaben zurückkam, ist Helmholtz, und zwar verwarf er anfangs auf Grund seiner Spectralfarben-Mischungsversuche die Annahme von drei Grundfarben im physiologischen Sinne. Er schreibt 1852 (in Müllers Archiv f. Anat. und Physiologie S. 480 und in Poggendorffs Annalen 87. Bd. S. 49, 65), die erwähnte Theorie von Young sei wichtig, weil darin den drei Grundfarben eine bestimmte physiologische Bedeutung untergelegt werde, da er aber weder mit Roth und Grün Gelb, noch mit Grün und Violett Blau von der Reinheit des spectralen Gelb und Blau zusammensetzen konnte, so erklärt er: „Wir werden demnach auch die Lehre von den drei Grundfarben, als den drei Grundqualitäten der Empfindung, wie sie Thomas Young aufgestellt hat, fallen lassen müssen." In demselben Jahre hatte Helmholtz auch den Versuch von Brewster, alle Spectralfarben aus Roth, Gelb und Blau zu mischen, widerlegt. (Poggendorffs Annalen 1852. Bd. 86).

Indessen blieb er nicht lange bei der Ablehnung der Annahme Youngs stehen. Im Jahre 1853 erschien nämlich eine Abhandlung von Grassmann (in Poggendorffs Annalen), welche mehrere Puncte der Theorie der Farbenmischung richtig stellte. Namentlich bewies Grassmann, dass jede homogene Farbe ihre Complementärfarbe hat, während Helmholtz damals nur Gelb und Blau von den Spectralfarben zu reinem Weiss hatte vereinigen können. Im Jahre 1855 aber stellte letzterer mittelst verbesserter Methoden die Wellenlängen vieler complementärer Farbenpaare, welche gemischt Weiss geben, fest und bewies folgenden Satz: Im Falle es eine Art gibt, die Intensitätseinheiten zu mischender Lichter so festzusetzen, dass die Lichtintensität der Mischung gleich ist der Summe der Intensitäten der gemischten Lichter (Grassmann), dann kann dreien Farben, aber nicht mehreren, ein willkürlicher Ort im Farbenfelde und eine willkürliche Einheit der Lichtintensität beigelegt werden, so zwar, dass dann der Ort und die Einheit der Intensität für alle anderen, auch für alle homogenen Farben, bestimmt ist, wobei aber nicht vorausgesagt werden kann, welche Curve diese bilden mögen (Poggend.

Ann. 1855. Bd. 94. S. 25, 26). „Sie ist fest bestimmt, sobald die Orte und Mengeneinheiten für die ersten drei Farben festgesetzt sind.“

Eine solche Festsetzung nahm nun Helmholtz damals nicht vor, sondern gab nur auf Grund der Newton'schen Schwerpuncts-Construction einen vorläufigen Entwurf des Farbenfeldes, indem er die Spectrum-Enden — Roth und Violett — durch eine gerade Linie verband, welche die im Spectrum nicht vorkommenden Mischfarben beider enthält , und in einer krummen Linie, deren Endpuncte eben Roth und Violett sind, die übrigen Spectralfarben je nach ihrem Abstande vom Weiss vertheilte. Dabei waren die Helligkeiten diejenigen, welche ungefähr aus einer directen Vergleichung der verschiedenen Farben durch das Auge resultiren, so dass Gelb dem Orte des Weiss am nächsten, Violett von ihm am weitesten entfernt zu liegen kam.

In dieser Untersuchung wird zwar Youngs Annahme nicht wieder erwähnt, es ist auch bei der versuchten Ableitung der Manigfaltigkeit der Farben von drei ursprünglichen Farben, nicht von Farbenempfindungen die Rede, wie bei Young, aber die Zugrundelegung von gerade drei Farben (im physikalischen Sinne) ist für die Weiterführung der Young'schen Idee bedeutungsvoll geworden.

§ 4. Maxwell und Helmholtz adoptiren und reformiren die Young'sche Hypothese.

Bald darauf nahm nämlich J. Clerk Maxwell auf Grund derselben und der Newton'schen Schwerpunctsconstruction die Young'sche Annahme wieder auf. 1856 theilte er kurz einige Resultate von Farbenmischungsversuchen mit, welche zwar mit Rücksicht auf die numerische Notation gleichfalls von drei willkürlich gewählten physiologischen Grundfarben, also Grundfarbenempfindungen, ausgingen, aber nur bestätigten, was Plateau 1819, J. D. Forbes in Edinburgh 1849 und Helmholtz 1852 gefunden hatten, namentlich dass Blau mit Gelb gemischt nicht Grün gibt (*Report of the 26th meeting of the British association for the advancement of science 1856. Lond. 1857. Communications p. 12, 13*).

1860 erschien dann in den Londoner *Philosoph. Transact.* die ausführliche Abhandlung von Maxwell über die Farbenperception (nach einigen kleineren Mittheilungen aus den Jahren 1856 und 1857). Hier wird Youngs Annahme mittelst der Young'schen Methode

(s. oben § 1), nämlich des Farbenkreisels, welchen man daher mit Unrecht den Maxwell'schen Farbenkreisel nennt, bestätigt. Nur setzte Maxwell die Grundfarben Roth, Grün und Blau statt Roth, Grün und Violett, und behauptete durch Mischung von Roth und Grün gesättigtes oder spectrales Gelb erhalten zu haben. Er prüfte auch Farbenblinde und lieferte durch vortreffliche Farbenmischungsversuche den Beweis, dass dem Daltonisten oder Rothblinden alle Farben aus zweien, nämlich Grüngelb und Blau gemischt werden können. Durch diese Arbeit war die Young'sche Theorie, wie man sie nannte, in England fast allgemein zu neuem Ansehen gelangt.

In Deutschland wurde sie bald darauf durch die physiologische Optik von Helmholtz, und zwar deren zweite (1860 erschienene) Lieferung, gleichfalls schnell bekannt und anerkannt. Die Bedenken, dass grünes und rothes Licht zugleich auf dieselbe Stelle der Netzhaut fallend, nicht spectrales, sondern ein fahles oder weissliches Gelb liefern und die Unmöglichkeit, ganz reines Blau aus Violett und Grün zusammenzusetzen, hinderten die Adoption der in bekannter Weise von Helmholtz scharfsinnig reformirten Young-schen Annahme nicht mehr. Dieselbe hiess vielmehr von da an die Young-Helmholtz'sche Hypothese, später die Dreifarbenlehre. Und es ist merkwürdig, dass man gerade die sogenannte partielle Farbenblindheit oder Achromatopsie als eine ihrer stärksten Stützen schon damals, wie vielfach noch jetzt, bezeichnet hat, obgleich die Herstellung sämmtlicher Farben aus Gelb und Blau für den Rothblinden (Helmholtz) zu der Hypothese nicht passt. Denn der Rothblinde soll nur Grün, Violett und deren Mischfarben empfinden können. Man hätte also für ihn, vom Standpuncte der Theorie aus, aus Grün und Violett alle Farben sollen mischen können, was nicht zutrifft, wenn man völlig gelbfreies Grün nimmt.

Dass Farbengleichungen aus Grün und Violett nicht, wohl aber solche aus Gelb und Blau dem Rothblinden alle Farben liefern, ist darum nicht im Einklang mit Youngs Annahme, weil ja Gelb selbst nur aus Roth und Grün erzeugt sein soll, Roth aber dem Rothblinden fehlt. Folglich musste man annehmen, dass der Rothblinde das Gelb grün empfinde. Warum liess es sich aber dann in den Farbengleichungen nicht durch Grün ersetzen? Schon in den ersten Untersuchungen, welche die Young'sche Hypothese stützen sollten, liegt also ein Grund vor, sie zu bezweifeln.

Ich will nun zunächst zeigen, dass die an typisch Farbenblinden gewonnenen Erfahrungen geradezu der Young'schen, zuerst von Maxwell und Helmholtz begründeten Annahme widersprechen. So sehr widersprechen ihr meine eigenen Untersuchungen und die Prüfungen einseitig Farbenblinder, dass ich sie, obwohl ich sie früher, als die Farbenblindheit wenig bekannt war, wie fast alle Physiologen, ausreichend fand, nun für gänzlich unhaltbar erklären muss. Sie hat viel geleistet, zu trefflichen Forschungen angeregt, sie ist von hohem heuristischem Werthe gewesen, aber sie gehört jetzt nur noch der Geschichte an: nach achtzigjährigem Dasein, also nach einer für physiologische Hypothesen ungewöhnlich langen Lebensdauer.

II. Die Farbenblindheit der Young-Helmholtz'schen Lehre zufolge.

§. 5. Die Rothblindheit, Grünblindheit, Violettblindheit.

Wenn ich hier, von allen Fällen erworbenen Farbenblindheit und vorübergehender Abnahme des Farbenunterscheidungsvermögens absehend, nur die sogenannten typisch Farbenblinden betrachte, welche von früher Jugend an, ohne sonstige Augenkrankheit, permanent gewisse Farben nicht empfinden, so folge ich darin dem Beispiele derer, welche diese typische Farbenblindheit als Hauptstütze der Dreifarbenlehre ansehen. Man unterscheidet bekanntlich auf Grund derselben Rothblinde, Grünblinde und Violettblinde und verlangt für erstere ein Fehlen oder Functionslosigkeit nur der sogenannten rothempfindenden Nervenfasern, für die Grünblinden den Ausfall nur der grünempfindenden und für die Violettblinden nur den Ausfall der violettempfindenden Nervenfasern.

Daraus folgt weiter, dass der typisch Rothblinde nur Grün, Blau und Violett, der Grünblinde nur Roth, Purpur und Violett, der Violettblinde nur Roth, Gelb und Grün empfinden kann. Die ursprüngliche und gegenwärtig noch vielfach vertretene Annahme geht nämlich davon aus, dass diejenige Lichtart welche jede der drei Faserarten absolut am stärksten erregt, sie auch relativ am stärksten erregt — im Verhältniss zu den zwei übrigen Faserarten — und davon, dass das Gelb und Blau ohne Vermittelung der grünempfindenden Fasern nicht zu Stande kommt. Man hat also für das normal sehende Auge I, für das rothblinde II, für das grünblinde III und für das violettblinde IV der Tafel (Vgl. Helmholtz physiolo-

gische Optik 1866) wobei die Erregungsgrade über den Wellenlängen aufgetragen gedacht sind.

§ 6. Die sogenannte typische Rothblindheit ist unvereinbar mit der Young'schen Hypothese.

Was nun II betrifft, so widersprechen dieser Darstellung die Beobachtungen direct, indem diejenige Stelle im Spectrum des Rothblinden, welche ich (dieses Archiv I, 1868, S. 312) als Trennungslinie *T* bezeichnete, und welche ihm nicht farbig, sondern „grau“ oder „hellgrau“ erscheint, nicht zwischen *F* und *G*, sondern immer zwischen *b* und *F* liegt. Diese neutrale Stelle *T* müsste der Young'schen Annahme zufolge da liegen, wo dem normalen Auge das reinste Blau liegt, d. h. das — von Grün sowohl wie von Roth. gänzlich freie — Urblau; denn läge *T* nicht an dieser Stelle, dann müsste es entweder links oder rechts davon liegen. Im ersteren Falle müsste die Stelle grün, im letzteren violett, statt farblos, erscheinen, wegen der überwiegenden Erregung einmal der grünempfindenden, dann der violettempfindenden Nervenfasern. Also *T* kann nur an der dem Durchschneidungspunct der Curve für Grün und der Curve für Violett entsprechenden Stelle liegen. Eben diese ist aber normaler Weise der Ort des reinsten Blau, weil ja, wenn dieses anderswohin fiele, im Blau entweder Grün oder Violett überwiegen müsste und Urblau unmöglich würde. Bestimmt man nun, wie ich es gethan habe, die Stelle im Spectrum, wo das ganz reine Blau liegt, so müsste das *T* des Rothblinden wenigstens ungefähr ebendahin fallen. Dieses trifft aber gar nicht zu, vielmehr liegt das *T* des Rothblinden nach meinen Bestimmungen (mit welchen sämmtliche späteren Beobachter übereinstimmen), wie ich schon 1868 angab, diesseits *F*, also an einer Stelle, wo niemand das reinste Blau sieht, an einer Stelle, welche sehr nahe oder genau an der Stelle des reinsten Grün liegt.

Da somit im Spectrum des Rothblinden thatsächlich die neutrale Stelle *T* constant eine ganz andere Lage hat, als die Young'sche Annahme nothwendig verlangt, so kann diese Annahme nicht richtig sein.

Hiermit ist aber nicht die Constanz der Wellenlänge des dem *T* entsprechenden Lichtes behauptet. Vielmehr konnte ich an mehreren sogenannten Rothblinden feststellen: 1) dass *T* zwar für alle

zwischen b und F, aber nicht in jedem Falle auf denselben Theilstrich der Scala fällt; 2) dass T für das linke Auge eine etwas andere Lage, als für das rechte Auge haben kann; 3) dass T bei geringer Lichtstärke als farbloser schmaler Streifen nicht gesehen wird, vielmehr die beiden Farben des Rothblinden, sein „Gelb" und „Blau" dann direct aneinandergrenzen; 4) dass T bei zunehmender Lichtstärke des Spectrum deutlich „hellgrau", dann „grauweiss", schliesslich „weiss" wird; 5) dass T mit zunehmender Lichtstärke nach dem brechbareren Spectrumende hin verschoben wird, so dass „Gelb" sich ausdehnt, „Blau" sich verkürzt. Die Werthe für die Verschiebung des T bestimmte ich zunächst bei einem Spectralapparat mit einem Prisma für den früher nicht untersuchten typisch rothblinden Herrn Eggers, der in dankenswerthester Weise sich den sehr zahlreichen Versuchen widmete. Es ergab sich constant Folgendes:

Spaltweite in Millim.	Theilstrich des T	Wellenlänge λ	Im Spectrum einer constanten Petroleumflamme:
0,240	zwischen 94 und 95		kein Streifen; links „Gelb", rechts „Blau"
0,250	$94^1/_2$	512,8	noch kein Streifen; dunkelgrauer Uebergang des Gelb zum Blau,
0,265	94 bis 95	—	ein sehr schmaler dunkelgrauer Streifen,
0,275	95	511,5	Streifen deutlich; bei 96 bis 97 reines Blau,
0,280	95	—	grauer sehr deutlicher Streifen,
0,295	$95^1/_2$	510,3	„ „ „ „ etwas heller,
0,300	fast 96	—	„ „ „ „ „ „
0,310	fast 96	—	der Streifen heller grau,
0,325	auf 96	509,0	„ „ noch heller,
0,350	$96^1/_2$	507,8	sehr schmaler Streifen, noch heller,
0,375	97	506,6	der Streifen sehr hell,
0,400	97	—	„ „ weiss.

Bei gleichbleibender Spaltweite trat die Verschiebung in demselben Sinne ein, wenn ich den Docht der Lampe höher schraubte.

Die Wellenlängen, welche den einzelnen Theilstrichen entsprechen, wenn die D-Mitte genau auf 71, b_3b_4 auf 93 und F auf 106,5 fallen, wurden mittelst der Fraunhofer'schen Linien und Kirchhoffs und Angströms Tafeln bestimmt. Sie sind in Milliontel-Millimeter angegeben. Da nun dem Theilstrich 94 die Wellenlänge 514 und dem Theilstrich 98 die Wellenlänge 504,3 Milliontel-Millimeter entspricht, so liegt T in diesem Falle zwischen $\lambda = 504$ und $\lambda = 515$, also viel näher bei b ($b_4 = 516{,}7$), als bei F ($\lambda = 486{,}07$), bei mittlerer Lichtstärke auf etwa 512.

Die hellste Stelle im Spectrum lag in diesem Fall bei einer Spaltweite von 0,185 Millim. hart neben D, und zwar links davon.

Bei Anwendung eines grösseren Spectralapparates fielen die Bestimmungen nicht so genau aus. Doch überschreiten die T-Stellen nicht die Wellenlängen 516 und 500 bei Isolirung wie bei directer Betrachtung des Sonnenspectrum. Und wenn ich nach Isolirung des „reinen" T-„Grau" die Lichtstärke zunehmen liess, dann wurde es jedesmal „gelb", beim Abnehmen derselben „blau".

Bei Sonnen- wie Lampen-Licht wird die isolirte Stelle „rein hellgrau" d. h. weder „gelblich" noch „bläulich" gefunden. Die grössere Dispersion und störende Wirkung des zerstreuten Lichtes bei Spectralapparaten mit mehr als einem Prisma macht aber die Bestimmungen des Ortes des T dabei ungenau. Das „Grau" ist dem „Gelb" weit jenseit b_1 beigemischt und dem „Blau" nicht weniger bis gegen $\lambda = 494$. Die Angaben darüber, wo das reinste Grau liege, in dem Intervall $\lambda = 500$ bis 514, waren daher natürlicherweise nicht in jedem Falle unter sich völlig übereinstimmend, bei Anwendung eines Prisma dagegen stets in vollkommener Uebereinstimmung wochenlang, gleich viel wie und wann ich prüfte. Daher sind die letzteren allein ganz zuverlässig, und der Ort des T bei reinstem Spectrum entspricht in diesem sehr sorgfältig und oft von mir untersuchten Falle ganz sicher dem mir rein grünen Lichte mit $\lambda = 510$ bis 514, bei zunehmender Lichtstärke nach F hin vorrückend bis über $\lambda = 507$ hinaus. Das Gesammtresultat aller Beobachtungen am grossen Apparat bei *mittlerer* Lichtstärke weist übrigens dem T ebenfalls ein λ zwischen 510 und 514 zu.

Ferner müsste der Rothblinde nur die Farben Grün, Blau und Violett empfinden können. Es ist aber durchaus nicht der Fall. Der sogenannte Rothblinde oder Daltonist empfindet vielmehr nur die beiden Farben Gelb und Blau. Man kann zwar nicht sogleich wissen, was der Farbenblinde meint, wenn er von Farben spricht. Ich habe jedoch schon 1872. (Centralbl. für die medic. Wissensch. 1872, S. 113, 160) hervorgehoben, dass zur Ermittelung der Farbenempfindungen Farbenblinder solche Individuen dienen können, welche nur auf einem Auge farbenblind sind, mit dem anderen dagegen die Farben richtig erkennen und sie richtig mit Worten bezeichnen. Bei ihnen controlirt das eine Auge das andere. Ich suchte nach solchen Fällen, ohne jedoch ein unilateral typisch farbenblindes Individuum zu finden. Dagegen sind in der neuesten

Zeit mehrere derartige Farbenblinde entdeckt worden und zwar von O. Becker (Gräfes Archiv für Ophthalmologie. Bd. 25.) in Heidelberg, von v. Hippel (Gräfes Archiv für Ophthalmologie 1880. Bd. 26. S. 176.) in Giessen, von F. Holmgren (Centralblatt für die med. Wiss. 11. Dec. 1880.) in Upsala. Ich werde diese seltenen für jede Farbentheorie ungemein wichtigen Fälle nach ihren Entdeckern benennen. Im Hippel'schen Fall ist die Rothblindheit vollkommen; die Trennungslinie, welche der Patient Anfangs nicht sah, wurde nachdem aufs Neue geprüft worden war, wie mir Herr v. Hippel brieflich zu bestätigen die Güte hatte, an der von mir bezeichneten Stelle vor *F* gesehen, (Centralblatt für die med. Wiss. 1. Jan. 1881. S. 1.), wohin sie auch Holmgren, der denselben Patienten untersuchte, verlegt. In diesem Hippel'schen Fall nun, wo die Worte „Roth, Gelb, Grün, Blau, Violett" denselben Sinn wie beim Normaläugigen haben, da das gesunde Auge diese Farben gut erkennt und unterscheidet, besteht das Spectrum für das farbenblinde Auge nur aus Gelb und Blau, nicht aus Grün, Blau und Violett, wie Young's Annahme verlangt. Mit Entschiedenheit betont Hippel, dass sein Patient mit seinem farbenblinden Auge das reine Gelb und Blau nicht anders empfindet, als mit dem normalen. Er hat ihn nach dem Erscheinen von Holmgren's vorläufiger Mittheilung (im Centralblatt für Dec. 1880) noch wiederholt auf diese Frage hin untersucht und stets von ihm die Antwort erhalten, dass das reine spectrale Gelb auf beiden Augen völlig gleich erscheint, das reine Blau in der Qualität der Farbe ebenfalls beiderseits gleich, nur auf dem farbenblinden Auge eine Spur lichtschwächer (Briefliche Mittheilungen von Prof. v. Hippel an mich). Holmgren hatte nämlich gemeint, das Gelb des farbenblinden Auges sei grünlich (a. a. O.), ohne es aber, wie er auch selbt erklärt, sicher festzustellen.

Aus dieser Thatsache, dass ein von einem der hervorragendsten Vertheidiger der Young-Helmholtz'schen Lehre für typisch rothblind erklärtes Auge reines Gelb und reines Blau als solche empfindet, folgt, dass Gelb nicht durch die combinirte Erregung von roth- und grün-empfindenden Fasern zu Stande kommt, auch nicht durch das Zugleichsein der Empfindungen Grün und Roth, denn hier fehlt die eine Componente Roth; dieser Theil der Young'schen Annahme ist also unzulässig. Ebenso fällt durch den Hippel'schen Fall die andere Annahme, dass Blau nur durch

combinirte Erregung von grün- und von violett-empfindenden Nervenfasern zu Stande käme und die, dass Violett die dritte Grundfarbe sei, denn der Rothblinde empfindet gar kein Violett, sondern ganz reines Blau am kurzwelligen Spectrumende.

Im Ganzen sind somit die sicheren Erfahrungen an typisch Rothblinden keine Stützen der Young-Helmholtz'schen Annahme, sondern stehen vielmehr mit ihr in directem unlösbarem Widerspruch. Denn sämmtliche zuverlässige Erfahrungen über typische Rothblindheit stimmen mit dem Hippel'schen Fall in den erwähnten Puncten überein.

§ 7. Desgleichen die sogenannte typische Grünblindheit.

Nicht besser steht es mit den Grünblinden. Der Theorie nach müssten dieselben im Spectrum nur Roth, Purpur und Violett empfinden. Es ist aber ein typisch Farbenblinder, von dem man aussagen könnte, dieses sei wirklich der Fall, niemals beobachtet worden, vielmehr empfinden die sogenannten Grünblinden am kurzwelligen Spectrumende eine Farbe, von der sie mir mit der grössten Entschiedenheit sagen, sie sei ganz rein, keine Spur einer Beimengung von Gelb, Roth oder irgend einer anderen Farbe sei da vorhanden. Violett kann diese Farbe also nicht sein, wohl aber Blau. Ferner ist bei den von mir untersuchten sogenannten Grünblinden die neutrale Stelle T zwischen b und F so nahe dem T der Rothblinden gelegen, dass man die Abweichungen nicht selten kleiner findet, als die der Ablesungen eines und desselben Grünblinden, was nach der Theorie nicht sein dürfte. Denn dieser zufolge müsste T für Grünblinde zwar an der Stelle des reinsten Grün, für Rothblinde aber weit davon an der Stelle des reinsten Blau liegen (siehe § 6), was nicht zutrifft. Wesentlich ist auch, dass die sogenannten Grünblinden bezüglich der Qualität dieselben Farbenverwechselungen zeigen, wie die sogenannten Rothblinden, so dass schliesslich nur noch als Unterscheidungsmerkmal die angebliche Verkürzung des langwelligen Spectrumendes übrig bliebe, welche die Theorie verlangt. Aber auch diese ist hinfällig. Denn bei zwei typisch Rothblinden konnte ich sicher feststellen, dass das langwellige Roth bei a und A, welches ein dickes Cobaltglas noch durchlässt, sehr wohl (als „gelbe“ Lichtempfindung) erkannt wurde. Einer (E. 1881) sieht deutlich jenseit A noch „gelbes“ Licht und jenseit H_2 noch „Blau“, also keine Verkürzung des nur

zweifarbigen Spectrum, namentlich wird die isolirte Kaliumlinie $Ka\,\alpha$ mit $\lambda = 768$ noch als „dunkelgelb" und H_2 mit $\lambda = 393$ als schwarzer Strich (oder „dunkelbrauner" Strich) vollkommen sicher erkannt (Vgl. auch dieses Archiv I, S. 313). Prof. v. Hippel theilt mir mit, die Verkürzung am rothen Ende des Spectrum sei in seinem Fall eine minimale und betreffe nicht nur das farbenblinde, sondern auch das normale Auge. Da ich nun bei meinen Farbenblinden gleichfalls keine Verkürzung fand, öfters aber bei farbentüchtigen Augen eine geringe Verkürzung, so ist kein Grund mehr vorhanden, überhaupt Rothblinde von Grünblinden zu trennen. Beide sehen im Spectrum nur Gelb und Blau und zwischen beiden, bei einer gewissen nicht sehr geringen Lichtstärke, einen farblosen schmalen Streifen *T*. Die Curven II und III sind demnach ganz und gar bedeutungslos.

§ 8. Desgleichen die sogenannte typische Violettblindheit.

Die dritte Classe typisch farbenblinder Individuen, die Violettblinden, sollen der Theorie zufolge nur Roth, Gelb und Grün empfinden. Blau fällt fort, weil Violett fortfällt. Nun zeigt aber der seltene und interessante Fall einer unilateralen „Violettblindheit" von Holmgren, dass dabei Gelb überhaupt nicht empfunden wird, sondern nur Roth und Grün. Zwischen diesen beiden Farben liegt an der dem Durchschneidungspuncte der roth- und grün-empfindenden Fasern entsprechenden Stelle, die Trennungslinie: zwischen *D* und *E*, näher bei *D*, dicht an der Stelle, welche ich selbst 1868, damals noch der Young-Helmholtz'schen Lehre zugethan, auf Grund derselben ihr zuschrieb (dieses Archiv I, S. 326, 328) ohne dass ein Fall von Violettblindheit beobachtet war. Das Eintreffen dieser Vorhersagung, sowie das Roth- und Grün-Sehen des Violettblinden, könnten als glänzende Bestätigung der Dreifarbenlehre angesehen werden — und Holmgren deutet seinen Fall entschieden zu Gunsten derselben — aber es ist nicht zu übersehen, dass der sogenannte Violettblinde nur Roth und Grün empfindet und keine Spur von Gelb. Wie kann der Ausfall des Violett das Gelb eliminiren? Selbst wenn man zugibt, es sei der Theorie gemäss, dass an Stelle des Urgelb, an der dem Durchschneidungspunct der Curve Roth und der Curve Grün entsprechenden Stelle des Spectrum, als der gleichstarker Erregung beider noch übrigen Faserarten (also aller Fasern des Violettblinden) Grau

oder Weiss empfunden wird, kann man nicht einsehen, weshalb dicht daneben reines Roth und auf der anderen Seite reines Grün empfunden wird. Denn beidseitig werden die roth- und die grün-empfindenden Fasern stark erregt und es ist kein Grund angebbar, weshalb nicht auf der einen Seite wenigstens Rothgelb und auf der anderen Grüngelb zu Stande kommen sollte. Werden doch beide Faserarten der Young-Helmholtz'schen Annahme zufolge beim Violettblinden wie beim Normaläugigen stark erregt. Trotzdem kommt keine Gelb-Empfindung zu Stande. Folglich widerspricht auch die sogenannte Violettblindheit der Dreifarbenlehre.

§ 9. Man modificirte die Young'sche Lehre, indem Blau statt Violett, als dritte Grundfarbe angenommen wurde.

Man könnte nun alle diese, so viel ich sehe, unwiderlegbaren Einwände anerkennend, beantworten, allerdings in der ersten Fassung, mit den drei Grundfarben Roth, Grün, Violett, sei die Young'sche Annahme unhaltbar, aber schon Maxwell habe 1860 Blau als dritte Farbe gesetzt und in dieser Form fielen die von mir hervorgehobenen Widersprüche fort.

Es ist richtig, dass die drei Grundfarben Roth, Grün und Blau weniger offenkundige Widersprüche mit der Beobachtung erkennen lassen. Ich selbst habe 1868 ebenso wie (1864) A. Fick und S. Exner (1868) Blau als Grundfarbe angenommen, nach 1868 auch Helmholtz eine Zeit lang. Später aber setzte er das Violett wieder an die alte Stelle, weil J. J. Müller kein spectrales Violett durch Mischung erhalten konnte. Auch andere behalten Violett bei. Sicherlich wird durch die obigen Darlegungen dieser Mischfarbe der Rang einer physiologischen Grundfarbe wieder genommen.

Aber auch mit Blau als dritter Grundfarbe kann man die Young-Helmholtz'sche Lehre nicht mit den Thatsachen vereinigen, welche durch die Untersuchung unilateraler Farbenblindheit bekannt geworden sind.

§ 10. Die Thatsachen der typischen Farbenblindheit stützen diese Modification nicht, sondern widersprechen ihr.

Zunächst die Rothblindheit. Jetzt kommt zwar T nahe bei F an die Stelle des reinen Grünblau (ohne Ueberwiegen des Blau und

des Grün) zu liegen, aber nach wie vor wird nicht Grün, sondern statt dessen reines Gelb empfunden, was der Theorie widerstreitet. Denn diese duldet kein Gelb ohne rothempfindende Fasern. Ausserdem müsste man eine zweite Erhebung der Curve für Roth annehmen, um das Violett zu erklären, eine Hülfshypothese, welche zuerst Maxwell einführte.

Die Grünblinden verhalten sich, wie ich (§ 7) zeigte, in jeder Beziehung so übereinstimmend mit den Rothblinden, dass man keinen durchgreifenden Unterschied im Verhalten beider mehr angeben kann. Höchstens die Lage von T käme aufs Neue in Betracht. T müsste der Theorie nach jetzt für Rothblinde dicht vor F, für Grünblinde dicht hinter b liegen. Denn thatsächlich findet man bei beiden T nur zwischen b und F (und niemals reichte das Grau in meinen Fällen über $\lambda = 494$ hinaus; F hat $\lambda = 486$). Nun ist aber der Raum zwischen b_4 und F, in welchen also, wenn Blau die dritte Grundfarbe ist, T für Grünblinde und für Rothblinde thatsächlich fällt und der Theorie nach fallen kann, für ein und dasselbe Auge bei veränderlicher Lichtstärke für das T grösstentheils vergeben, wie ich gefunden habe (s. § 6). Bei geringerer Intensität des Lichtes, so dass jedoch die Nachbarfarben Gelb und Blau vorzüglich deutlich erkannt und in ihrer ganzen Ausdehnung sichtbar werden, liegt T nahe bei $\lambda = 512$ und rückt bei zunehmender Lichtstärke nach F zu vor, ohne F auch bei der grössten Lichtstärke zu erreichen. Wenn nun schon für jedes sogenannte rothblinde Auge T mit der Lichtstärke variirt innerhalb des grössten Theiles, in welchen T für sogenannte Rothblinde und Grünblinde überhaupt fällt, dann kann man nicht aus den verschiedenen Lagen des T auf eine Verschiedenheit der Rothblinden und Grünblinden schliessen, wie es Donders thut. Hätte er gewusst, wie abhängig der Ort des T von der Lichtstärke ist, dann würde er dieses Kriterium nicht haben gelten lassen. Wie unzulässig es überhaupt erscheint, in der überwiegend auf der G-Seite von F sich ausdehnenden Strecke von bläulichgrünen, blaugrünen, grünblauen, grünlichblauen Farben, die dem Durchscheidungspunct der Curve Grün und der Curve Blau entsprechende Stelle, deren Farbe also ebensoviel Grün wie Blau enthalten und dem T des Rothblinden entsprechen soll, ganz dicht an die Stelle des Urgrün des Normaläugigen zu verlegen (zwischen b und F, wo eben das T des Grünblinden liegt, das ist durch

einen Blick auf die Curven und die damit verglichene Betrachtung reiner Spectren deutlich. Verlegt man aber das T der Rothblinden zwischen F und G oder nur auf F, so widerspricht dieses der Natur, welche bei verschiedenen Lichtstärken für Roth- und Grün-Blinde T zwischen b und F zeigt. Also auch wenn Blau die dritte Grundfarbe ist, kann der factische bei Roth- und Grünblinden constatirte Befund mit Young's Annahme nicht vereinigt werden.

Endlich die Blaublindheit. Sie hätte an die Stelle der Violettblindheit zu treten. Aber der Einwand, den ich in Bezug auf diese im Young-Helmholtz'schen Sinne gar nicht existirende Anomalie vorhin (§ 8) vorbrachte, besteht in voller Kraft auch für die Blaublindheit. Weshalb soll, wenn Blau fehlt, kein Gelb, kein Rothgelb, kein Grüngelb, sondern nur das Paar Roth und Grün, die vermeintlichen Componenten des Gelb, empfunden werden? Die Dreifarbenlehre hat darauf keine Antwort. Fest steht aber nach Holmgren, dass der typisch Blaublinde (den er violettblind nennt) nur noch Roth und Grün und kein Gelb empfindet.

§ 11. Weitere Modificationen der Helmholtz'schen Lehre sind ebenso unzureichend sie aufrecht zu halten.

Hiernach kann auch, wenn man die drei Grundfarben Roth, Grün, Blau zur Darstellung der Thatsachen im Sinne der Dreifarbenlehre verwendet, dieselbe nicht aufrechterhalten werden.

Man könnte nun durch weitere Modificationen dieser Lehre sie leistungsfähiger zu machen suchen, wie es auch von Einigen versucht worden ist. Ich selbst hob hervor (1868), dass jedenfalls mit Zugrundelegung der drei Farben Roth, Grün, Blau die Puncte absolut stärkster Erregung jeder der drei Fasergattungen nicht nothwendig mit den Puncten relativ stärkster Erregung derselben coincidiren. Andere haben versucht, die Perception des Gelb seitens Rothblinder bis zu einem gewissen Grade im Einklang mit der Dreifarbenlehre zu finden. Aber diese und ähnliche Bemühungen, die Widersprüche auszugleichen, machen fast den Eindruck, als wenn man die Thatsachen mit Gewalt in die zu enge Hypothese zwängen wollte, während doch sonst umgekehrt die Hypothesen nach den Thatsachen sich richten.

Die von mir oben angegebenen Beobachtungen und Deductionen vertragen sich jedenfalls nicht mit der Dreifarbenlehre. Ich suche daher nach einer anderen Farbentheorie.

III. Kritik der Hering'schen Hypothese.

§ 12. Dieselbe erhält durch die Thatsachen der Farbenblindheit starke Stützen.

Von allen Versuchen, die Gesammtheit der Farbenempfindungen in einen physiologischen Zusammenhang zu bringen, ist der von Ewald Hering (Zur Lehre vom Lichtsinne, 6 Mittheilungen in den Sitzungsberichten der k. Akademie d. Wissensch. zu Wien, 46. 48. 49. Bd. 1872—1874) unternommene allein nicht widerlegt, und die neuesten Beobachtungen an einseitig farbenblinden Individuen verleihen ihm starke Stützen. Denn was sein Urheber (Zur Erklärung der Farbenblindheit. Prag, Tempsky, 1880) ehe jene Fälle ihm bekannt sein konnten, aus seinen eigenen Untersuchungen folgerte und als nothwendige Consequenz seiner Theorie hinstellte, hat sich durchaus erwahrt. Wenn er verlangt, dass ein rothblindes Auge auch grünblind und ein gelbblindes auch blaublind sei und umgekehrt, so bestätigen der Hippel'sche einseitig Rothgrünblinde und der Holmgren'sche einseitig Gelbblaublinde dieses Postulat vollkommen. Und Hering's theoretisch angenommene totale Farbenblindheit wird durch den Magnus'schen Fall (Centralblatt für praktische Augenheilkunde, December 1880) verwirklicht. Der Becker'sche Fall wurde schon von ihm selbst zur Entkräftung der Young-Helmholtz'schen Lehre verwerthet. Man kann jedoch von diesem Angriff nicht behaupten, dass er für sich mehr als eine grosse Unwahrscheinlichkeit der Dreifarbenlehre beweise. Ich glaube erst durch die Beweisführung im vorigen Abschnitte die Widerlegung auf anderem Wege stringent gemacht zu haben.

Durch die Widerlegung der Young-Helmholtz'schen Hypothese wird jedoch keine andere Farbenlehre als richtig dargethan.

§ 13. Darum ist sie aber nicht als durchaus acceptabel anzusehen.

Trotz der fast astronomisch sicher prophezeiten und erfüllten Beobachtungen, durch welche Hering's Theorie gestützt wird, soweit sie sich auf Farbenblindheit bezieht, wäre es voreilig, nun auch alle anderen Satzungen derselben als höchst wahrscheinlich oder gar als die zur Zeit einzig acceptabeln gelten zu lassen.

Als die epochemachende „Physiologische Optik“ von Helmholtz im Jahre 1866 vollständig erschienen war und man darin die Young’sche Idee mit grossem Scharfsinn ausgeführt und zu einer bestechenden neuen Farbenlehre umgestaltet fand, da erwiesen sich bald gleichfalls mehrere Voraussagungen als richtig. Ich beschrieb 1868 (dieses Archiv I. S. 310) zwei Fälle von sogenannter Grünblindheit und einen von sogenannter Rothblindheit, welche allen Anforderungen jener Lehre vollkommen zu entsprechen schienen. Ja ich sagte auf Grund derselben vorher, dass wenn es Blaublinde gebe, die für jede Farbentheorie ungemein wichtige neutrale Stelle im Spectrum Blaublinder nahe an der Stelle des reinsten Gelb Normaläugiger liegen müsse, was jetzt in der That sich als richtig erwiesen hat, ebenso wie meine andere Angabe, dass Rothblinde kein Violett, sondern Blau am kurzwelligen Spectrumende sehen u. a. m.

Aus solchen richtigen Vorhersagungen folgt nicht etwa, dass die Dreifarbenlehre in irgend einer Form zu retten wäre, wie aus den falschen ihr Untergang. Es ist schon oft vorgekommen, dass man auf Grund falscher Voraussetzungen richtig prophezeite. Darum darf man auch trotz der glänzenden Bestätigung der Hering’schen Postulate, die Grundlagen seiner Licht- und Farben-Theorie nicht sämmtlich als mit bestätigt ansehen. Ich hege vielmehr gegen dieselbe einige Bedenken, welche nicht beseitigt werden können, ohne die ganze Theorie zu erschüttern.

§ 14. Erster Einwand. Die Bestimmung der Begriffe Helligkeit und Sättigung führt zu Widersprüchen.

Die Hering’sche Lehre geht davon aus, dass sechs verschiedene Processe in dem Sehapparat stattfinden, welche sechs verschiedenen einfachen Gesichtsempfindungen (sechs Erregbarkeiten, sechs Reizen) entsprechen, nämlich Schwarz, Weiss, Gelb, Blau, Roth, Grün. Unter „Helligkeit“ ist bei den aus Schwarz und Weiss zusammengesetzten farblosen Empfindungen nur die Deutlichkeit zu verstehen, mit welcher das Weiss aus dem Gemische hervortritt. Bei farbigen Empfindungen heissen die mit deutlichem Weiss versetzten „hellfarbig“, die mit deutlichem Schwarz versetzten „dunkelfarbig“. Unter „Sättigung“ ist der Grad der Reinheit oder Deutlichkeit zu verstehen, mit welcher die Farbe aus der Gesammtempfindung hervortritt. Je mehr Weiss also eine Empfindung

enthält, um so weniger gesättigt ist sie und zugleich um so grösser ihre Helligkeit. Ausserdem heisst die Vermischung der Farben mit farbloser Empfindung „Nuancirung“, mit Weiss „weissliche Nuance“, mit Schwarz „schwärzliche Nuance“.

Aus diesen Festsetzungen folgt zunächst, dass von der Deutlichkeit des Weiss in einer Farbenempfindung deren Helligkeit, Sättigung und Nuance abhängt. Wodurch unterscheiden sich diese drei Begriffe von einander? Zunächst ist offenbar „weisslich nuancirt“ = „hellfarbig“, „schwärzlich nuancirt“ = „dunkelfarbig“. Ferner ist jede „weissliche Nuance“ hell und ungesättigt. Jede „schwärzliche Nuance“ ist dunkel und ungesättigt. Die Sättigung ist dagegen maximal, wenn die Nuance weder weisslich, noch schwärzlich erscheint, d. h. aber: je heller und je dunkeler eine Farbe, um so weniger gesättigt ist sie. Die theoretisch vollkommen gesättigten Farben können demnach weder Weiss noch Schwarz enthalten. Die Theorie erklärt dieses ausdrücklich, indem sie sagt, die absolut reine Farbe enthalte vom Weiss so wenig wie vom Schwarz, „nämlich gar nichts“. Da nun die Helligkeit gegeben sein soll nur durch die Deutlichkeit des in der Farbe mit enthaltenen Weiss, die Dunkelheit nur durch das in ihr mitenthaltene Schwarz, so ist es eine unabweisbare Consequenz der Theorie, dass die weisslosen, schwarzlosen absolut reinen Farben weder hell noch dunkel sein können. Die Theorie umgeht dieses paradoxe Resultat ihrer eigenen Begriffsbestimmungen, indem sie erklärt, die reine Farbe sei gleich hell wie dunkel oder hell und dunkel zugleich und zwar deshalb, weil sie „ebensowenig eine Spur vom Schwarz wie vom Weiss“ enthalte. Wie eine Farbe dunkel und hell zugleich sein kann, ist ebenso unerfindlich, wie dass durch das gänzliche Fehlen des allein hellmachenden Weiss und des allein dunkelmachenden Schwarz eine Farbe gleich hell wie dunkel werden kann. Es müsste heissen: weder hell noch dunkel. Diese Consequenz widerspricht aber dem Begriff der Farbe, welche ohne Helligkeit nicht möglich ist. Ausserdem erklärt die Theorie nicht nur, dass die „absolut reinen Farben“ trotz des Fehlens der für Hellfarbigkeit und Dunkelfarbigkeit nothwendigen Bedingungen, „gleich dem mittleren Grau, Empfindungen von gleich grosser Helligkeit wie Dunkelheit oder von mittlerer Helligkeit oder Dunkelheit sein würden“, sondern auch dass die Farbe „ohne Aenderung ihrer Reinheit heller oder dunkeler

werden“ kann. Hier liegt ein offenbarer Widerspruch vor. Denn eine gesättigte Farbe wird durch Weiss verunreinigt, wenn sie heller wird, durch Schwarz, wenn sie dunkeler wird.

Eine von mir sicher festgestellte Thatsache ist die, dass jede Farbe nur bei einer einzigen Helligkeit ganz rein ist.

§ 15. Zweiter Einwand. Die licht- und farbengebenden Processe können nicht unabhängig von einander angenommen werden.

Ferner. Sechs specifisch verschiedene einfache Prozesse anzunehmen, aus welchen alle Gesichtsempfindungen entstehen sollen, ist bedenklich. Die Zahl ist gross und um so schwieriger wird es zu begreifen, wie alle sechs „fortwährend gleichzeitig, wenn auch mit sehr verschiedener Stärke in der Sehsubstanz stattfinden“ können. Alle sechs Grundempfindungen sollen immer gleichzeitig gegeben sein. „Jede Gesichtsempfindung ist daher eigentlich ein Gemisch aus den sechs Grundempfindungen, doch sind darin immer nur einige von den Grundempfindungen deutlich, die anderen unter der Schwelle.“ Zugleich deutlich können aber höchstens 4 von den 6 Grundempfindungen sein, nämlich Schwarz, Weiss und zwei Farben, und zwar nie Blau und Gelb zugleich, nie Roth und Grün zugleich. Die Glieder dieser Paare heissen daher Gegenfarben. Zunächst vermisse ich hier jede Aufklärung über die braune Farbe. Trotz der grossen Zahl von Grundempfindungen, kann ich aus der Theorie Braun (Schwarzbraun, Rothbraun, Gelbbraun u. a.) mittelst derselben nicht ableiten.

Sodann ist für die Theorie bedenklich, dass die drei Paare von Processen unabhängig von einander sein sollen. „Schwarzweisse Empfindungen“ sind allen Farbenempfindungen beigemengt, nicht aber diese jenen. Es gibt ein Schwarz ohne eine Spur von farbiger Beimengung und dasselbe muss ich vom Grau behaupten. Wenn sie auch bei allen Farbentüchtigen nicht vorkommen, so kommen sie doch bei den total Farbenblinden vor, wo keine farbengebenden Processe unter der Schwelle ablaufen. Es besteht also eine Abhängigkeit der Farbenempfindungen von den farblosen Empfindungen und Unabhängigkeit der letzteren von ersteren. Eine Rothgrünblindheit und eine Gelbblaublindheit kommen vor, nicht aber (abgesehen von Blindheit) eine Schwarzweissblindheit. Warum nicht? Weil die Farben ohne Schwarz-Weiss keine Hellig-

keit hätten, eine Farbe ohne solche aber ein Ungedanke ist. Die Processe, welche dem Schwarz-Grau-Weiss zu Grunde liegen, müssen da sein ohne die farbengebenden Processe. Diese aber setzen jene voraus, sind unter allen Umständen unmöglich ohne sie. Darum ist es nothwendig, dass im normalen Auge zwar die schwarz-weissen Processe immer stattfinden, nicht aber die farbengebenden, welche vielmehr erst beginnen können, wenn weder Schwarz noch Weiss, sondern eine zwischen diesen farblosen Extremen liegende Empfindung vorher da ist. Alle Farben werden bei langsam abnehmender Helligkeit, ehe sie in Schwarz übergehen, grau und entstehen aus Schwarz bei langsam zunehmender Helligkeit erst, nachdem Grau ihnen vorhergegangen ist. Mit anderen Worten: es ist unzulässig, anzunehmen, die 6 Paare von Stoffwechselvorgängen verliefen unabhängig von einander.

Uebrigens wird diese Annahme nur vorläufig aufgestellt, als die einfachere, welche aber mit den Thatsachen stimme.

§ 16. **Dritter Einwand. Im mittleren Grau wird nicht Weiss und Schwarz zugleich, sondern weder Schwarz noch Weiss empfunden.**

Wichtiger ist folgender Einwand. Die Theorie verlangt, man solle in dem mittleren oder neutralen Grau ebensoviel Weiss wie Schwarz empfinden. Ich muss dieses mit Entschiedenheit leugnen. Grau ist eine Lichtempfindung, von der man allenfalls sagen kann, sie erinnere an Schwarz, wenn das Grau dunkel ist, sie erinnere an Weiss, wenn es hell ist. Aber weder Schwarz noch Weiss sind in der Empfindung des neutralen Grau herauszuempfinden. Wenn man vom Blau durch Grün zum Gelb fortschreitet, so erinnert Grünblau, dann Blaugrün, Bläulichgrün an Blau wie Grüngelb, Gelbgrün, Gelblichgrün an Gelb, nicht aber reines Grün an Blau und Gelb. Grün enthält keines von beiden. Dieses anerkennt die Theorie ausdrücklich. Im Grau, durch das man vom Weiss zum Schwarz gelangt, soll es anders sein; es soll Schwarz und Weiss enthalten.

In der Zahl 8 ist nicht die 7 mit der 9 vereinigt, sondern sie ist eine von beiden verschiedene, zwischen beiden stehende, von beiden gleich weit entfernte Zahl, welche nicht durch Mischung erhalten wird. So auch weicht die dem mittleren Grau entsprechende Zwischen-Empfindung um gleichviel von den Extremen

ab. Weder Weiss noch Schwarz ist im neutralen Grau enthalten, sondern nur Grau. Niemand nennt auch das Grau schwärzlich-weiss oder weisslich-schwarz. Jedermann versteht aber, was gemeint ist, wenn man von Schwärzlich-grau und Weisslich-grau spricht. Also ist man nicht berechtigt zu sagen: „In jedem Grau empfinden wir Weiss und Schwarz zugleich, aber keines von beiden vollständig.“ Vielmehr muss es heissen: im mittleren Grau empfinden wir Licht, aber weder eine Farbe, noch Weiss noch Schwarz. Wer dieses bestreitet, weil man aus weissen und schwarzen Pigmenten graue Pigmente durch Mischung herstellen kann, müsste dann mit demselben Rechte verlangen, dass wir im mittleren Grau Roth und Grün oder Gelb und Blau unmittelbar empfänden, weil ja die Gegenfarben gemischt mittleres Grau ebenso sicher liefern, wie Schwarz und Weiss gemischt. Man kann nicht einmal sagen, Schwarz und Weiss neutralisiren sich im Grau in der Empfindung, denn dann müsste gar keine Empfindung übrig bleiben. Es ist aber eine Lichtempfindung da, und zwar ist sie nicht Weiss und nicht Schwarz. Geht man vom Weiss zum Grau, so hat nur die Helligkeit der Empfindung abgenommen, geht man vom Schwarz zum Grau, so hat die Helligkeit der Empfindung zugenommen. Nicht aber ist, wie die Theorie behauptet, im Grau eine Partialempfindung Weiss mit einer Partialempfindung Schwarz zur Totalempfindung Grau „gemischt“. Wir nennen ein weniger helles Farbloses grau und das noch weniger helle Farblose schwarz geradeso wie wir den weniger lauten Schall leise, den noch weniger lauten still nennen, ohne dass darum ein Schall mittlerer Stärke aus einem leisen und lauten, oder ein leiser aus einem stillen und lauten gemischt gedacht würde. Neutrales Grau ist mittelstarke farblose Helligkeits-Empfindung.

§ 17. Vierter Einwand. Die Empfindung des Schwarz ist die Empfindung der Netzhautruhe, nicht durch irgendwelche gesteigerte Erregung direct bedingt wie Grau, Weiss und die Farben.

Endlich habe ich noch bezüglich des Zustandekommens der Empfindung Schwarz und der Farben einen Einwand geltend zu machen. Es ist unzweifelhaft, dass Schwarz unter dem Einflusse objectiver Lichteindrücke zu Stande kommen kann und zwar indirect. Keine Aetherschwingungen bewirken direct die Empfindung

Schwarz, während viele Combinationen von Aetherschwingungen, welche die Netzhaut gleichzeitig afficiren, Grau und Weiss und Farben hervorrufen. Es muss also das Schwarz auf andere Weise entstehen, auch schon weil es im Finstern gleichgültig ist, ob man die Augen offen hat oder schliesst. Es entspricht vollkommen den Thatsachen, aber nicht der Theorie, zu sagen, dass tiefstes Schwarz entsteht, wenn die betreffende Netzhautstelle so schwach erregt ist, dass es zu keiner Lichtempfindung kommt. Dieser Zustand der Netzhaut, mag ihre Erregung noch so schwach sein, kann nicht unempfunden bleiben, so lange die Aufmerksamkeit sich auf ihn richtet, weil für alle Sinnesorgane gilt, dass sie Empfindungen liefern können, nur wenn der Ruhe-Zustand jedes Organs bereits bekannt ist. Wie könnte aber dieser Zustand minimaler Erregung der Sinnesnerven anders bekannt sein, als durch eine Empfindung? und zwar als durch die Empfindung der Ruhe? Je grösser eine vorhandene Empfindung ist, um so grösser muss die hinzukommende Erregung sein, um eine neue Empfindung zu geben, je geringer, um so geringerer Erregungszuwuchs genügt. Ist die vorhandene Erregung minimal, dann ist auch die Erregungszunahme, welche die Empfindung zu Stande kommen lässt, der Null am nächsten. Sie kann aber nicht zur Erregung Null hinzugedacht werden, weil man niemals sagen kann, ein Empfindungsapparat sei im Leben schlechterdings unerregt. Die Wärme, der Blutstrom, die Ernährung, die Spannung der Gewebe u. a. m. liefern permanente innere Erregungsmittel von variabler Stärke. Ist aber die Erregung niemals Null, so haben wir auch kein Recht, zu sagen, wenn die Aufmerksamkeit wach ist, die Empfindung könne gänzlich fehlen. Vielmehr muss die permanente minimale Erregung jedes Sinnesnerven zum mindesten die Empfindung der Ruhe desselben zur Folge haben als Gegensatz zu der Empfindung der Nicht-Ruhe oder Thätigkeit. Sonst könnte man nicht wissen, ob ein Organ in Ruhe oder thätig ist. So ist die Empfindung völliger Ruhe des Hörnerven die Stille, welche aber, wie das Augenschwarz, je mehr die Aufmerksamkeit auf sie gerichtet wird, um so unvollkommener (Vgl. meine Schrift die Grenzen der Tonwahrnehmung, Jena 1876. S. 64 [in meiner Sammlung physiologischer Abhandlungen 1877. I. S. 64]) wird. Die Geruchs-, Geschmacks-, Berührungs-Empfindung wird nur dadurch möglich, dass die mit der permanenten minimalen Erregung, d. h. Ruhe der betreffenden Sinnesorgane verbundene indifferente

Empfindung den Grund bildet, von welchem die durch gesteigerte Erregung herbeigeführten Empfindungen sich gleichsam abheben. So ist die Dunkelheit, Finsterniss, Schwärze die Empfindung der tiefsten Netzhautruhe, aus welcher die Empfindungen des Grau, des Weiss und des Farbigen heraustreten, sowie die Netzhautruhe unterbrochen wird, sei es durch innere, sei es durch äussere Reize.

Nach und bei gesteigerter Erregung wird die Schwärze am tiefsten im Contrast zum Weiss, wie nach heftigem Lärmen und in der Pause in der Musik die Stille am tiefsten wird, weil jeder nervöse Apparat so construirt ist, dass einseitige Steigerung der Erregung verminderte Erregung mit sich bringt, wo die Ursache der Erregungs-Steigerung nicht in ihm wirkt. Ebenso bewirkt locale Verminderung der Erregung eines nervösen Apparates Steigerung der Erregung desselben da, wo die Ursache der Verminderung der Erregung nicht in ihm wirkt. Ist die Wage im Gleichgewicht und wird eine Wagschale schwerer belastet, dann hebt sich die andere, wird die eine entlastet, dann sinkt die andere. Dieses in der gesammten Physiologie der Nervenfaser und Ganglienzelle gültige Princip bildet die Grundlage für das Verständniss aller Contrast-Erscheinungen, im Besonderen der Empfindung des Schwarzen. Und ich wüsste keine Untersuchung zu nennen, aus welcher dieses deutlicher hervorginge, als gerade Herings Untersuchung der Lichtinduction. Denn, wie er sehr richtig hervorhebt, tritt Schwarz durch den Einfluss des objectiven Lichtes überhaupt erst rein auf. Die Netzhauterregungen gleichen den Hebungen und Senkungen der Wagschalen, die Gewichte sind die Reize. Ist die linke Schale stark belastet, die Erregung gross, dann ist die Lichtempfindung oder Helligkeit sehr deutlich, die Schwarzempfindung oder Dunkelheit daneben deutlicher als zuvor, die rechte Schale emporgeschnellt. Entfernt man plötzlich die Gewichte, d. h. schliesst man die Augen lichtdicht, dann sinkt die rechte Schale rasch, die linke steigt, d. h. die Empfindung der Dunkelheit tritt ein, wo es vorher hell war, weil die Reize fehlen, und wo es vorher dunkel war, wird es nun vorübergehend heller (Herings „Lichthof“). Nur das Gewicht der Wagschale selbst ist schiesslich noch als Reiz wirksam, d. h. die Summe der inneren Reize der Netzhaut. Je länger aber objective Reize fern bleiben, um so erregbarer wird die Netzhaut — die unbelastete Wage ist empfindlicher, als die belastete — so

dass die inneren Reize, ohne an Stärke zuzunehmen, bald wieder eine Lichtempfindung, Grau, auf dem lichtlosen Dunkel der minimal erregten Netzhaut hervorrufen.

Bekanntlich ist für jeden Menschen diese Empfindung des tiefsten Schwarz mit einem Gefühl der Ruhe, des Ausruhens des Auges verknüpft, dagegen die Empfindung des hellsten Lichtes und schon die leuchtender Farben mit einem Gefühl von Anstrengung. Es gibt kein blendendes Schwarz, sondern nur blendende Helligkeit, wie es keine betäubende Stille, sondern nur betäubenden Lärm gibt.

Hiernach kann ich zwar den Theil der Theorie gelten lassen, welcher besagt, dass dem Weiss oder Hell und dem Schwarz oder Dunkel zwei verschiedene Qualitäten des chemischen Geschehens in den Sehorganen entsprechen, Assimilirung (dem Schwarz) und Dissimilirung (dem Weiss); aber es ist nicht gerechtfertigt, den Assimilirungsprocess ebenso wie den Dissimilirungsprocess als Erregung zu bezeichnen. Jener entspricht vielmehr der Ruhe. Helligkeit ist gestörte Ruhe, Finsterniss tiefste Ruhe der Netzhaut.

Ich finde nirgends einen Anhalt zur Begründung der Annahme, dass man neben dem Ruhezustand, welcher der Theorie zufolge unempfunden bleiben müsste, „eigentlich zwei verschiedene Arten der Erregung zu unterscheiden hat," eine durch assimilatorische (oder synthetische, restitutive) Processe bedingte, eine zweite durch dissimilatorische (Spaltungs- oder consumptive) Processe bedingte „ermüdende" Erregung. Vielmehr entspricht die letztere dem Zustande der Thätigkeit, die erstere dem der Ruhe, welche aber stets nur eine wegen Fehlens äusserer Reize herabgesetzte Thätigkeit ist. Die Unterscheidung zweier Erregbarkeiten und zweier Reize, die der Dissimilirung und Assimilirung (D und A) entsprechen sollen, würde eine gänzliche Umformung der Begriffe Reiz, Erregbarkeit und Erregung verlangen, deren Nothwendigkeit um so weniger bewiesen ist, als die feststehende Unterscheidung von Ruhe und Thätigkeit nervöser Apparate doch bestehen bliebe und, soviel ich finde, A-Erregung = Ruhezustand = Schwarz ist.

„Hell" und „dunkel" sind in der That nicht mehr verschieden von einander wie „laut" und „leise" (oder „hart" und „weich" „schwer" und „leicht"). „Hell" (von „hallen") bezog sich ursprünglich sogar nur auf Schall, wie noch jetzt von einer hellen Stimme, einem hellen Klang gesprochen wird. „Hell" und „dunkel" sind

eben nur auf Gesichtsempfindungen angewendete Ausdrücke für „stark-schwach“, Grade einer Intensitäts-Scala der Empfindung, Stufen der Empfindungs-Stärke. Assimilirungsvorgänge würden, wenn sie ohne Dissimilirung vorkämen, der Erregung Null entsprechen (vielleicht im embryonalen Ohr und Auge) die keine Empfindung gibt, Assimilirung mit minimaler Dissimilirung entspricht dem tiefsten Schwarz, der tiefsten Stille, der geringsten Erregung, der grössten Ruhe. Dissimilirungsprocesse geben, wenn sie zunehmen, immer deutlichere Helligkeit (Lautheit) in der Empfindung. Dissimilirung ohne alle Assimilirung würde dem die Netzhaut zerstörenden blendenden Weiss, dem taubmachenden Knall, entsprechen. Wenn aber die Theorie davon ausgeht, dass ausser dem Schwarz noch andere Gesichtsempfindungen, nämlich Farben (welche? wird noch nicht angegeben) durch assimilatorische Processe bedingt seien, so übersieht sie, dass alle Farben auf Thätigsein des Sehnerven beruhen, also mit einem Verbrauch von organischem Material verbunden, also doch nicht assimilatorisch und immer ermüdend sind. Und wenn sie behauptet, einige Farbenempfindungen seien nicht dissimilatorisch, also mit einem solchen Verbrauch nicht verbunden (A-Farben), dann muss sie zur Beseitigung der Ermüdung, die sich nun ein für allemal nicht bestreiten lässt, wenn man eine beliebige Farbe lange empfindet, dissimilatorische Processe heranziehen. Diese sind aber consumptiv. Was also bei der einen Farbenempfindung Ermüdung herbeiführt, bewirkt Erholung bei einer anderen und umgekehrt. Der Begriff einer Nervenermüdung durch assimilatorische Processe (nicht zu verwechseln mit der „A-Ermüdung“ nach Verbrauch des assimilirbaren Materials) ist namentlich darum wenig plausibel, weil durch die Schwarz gebenden Assimilirungen, wenn sie andauern, keine Ermüdung des Sehorgans, sondern das Gegentheil, erhöhte Erregbarkeit für alle Reize eintritt. Die „A-Farbe“ ist aber ebensowohl ermüdend wie die „D-Farbe“, nur Schwarz ermüdet nicht.

§ 18. Die Vorzüge der Hering'schen Hypothese.

Die vorgetragenen Einwände gegen die Herings'che Farbenlehre genügen, um zu zeigen, dass sie in sich selbst nicht ganz widerspruchsfrei, nicht im völligen Einklang mit den Thatsachen, etwas complicirt und vielleicht doch nicht ausreichend ist, über alle Aenderungen der Farbenempfindungen Auskunft zu geben.

Ich kann daher diese Lehre in ihrer gegenwärtigen Form nicht acceptiren. Nichtsdestoweniger bezeichnet Herings Theorie, namentlich seine Entdeckung des wahren Verhaltens farbenblinder Augen, einen der grössten Fortschritte der physiologischen Farbenlehre, weil sie bei der Erklärung des Zustandekommens der Licht- und Farben-Erscheinungen in erster Linie in den nervösen Apparaten vorsichgehende Processe zu verwerthen sucht, statt psychische Factoren für alles verantwortlich zu machen, was nicht sogleich sich physiologisch vermitteln lässt und weil sie durch den Appell an die unmittelbare eigene Empfindung die häufige Verwechslung der objectiven Reize (die auch „Licht" und „Farbe" heissen) und der nur subjectiven Empfindungen Licht und Farbe zu vermeiden sucht. In beiderlei Beziehung baue ich nun weiter auf demselben Felde, und wenn ich auch zur Zeit die geltend gemachten Einwände nicht zu beseitigen vermag, ohne die Theorie fallen zu lassen, zweifle ich nicht an dem Zustandekommen einer Einigung.

IV. Grundlagen einer neuen Farbenlehre.

§ 19. Die Farbenempfindung ist eine Manigfaltigkeit von nur zwei Dimensionen.

Nachdem die beiden herrschenden Farbentheorien als unzulänglich erkannt sind, will ich versuchen, mit Beibehaltung des Brauchbaren aus beiden die Licht- und Farbenempfindungen in einen natürlichen Zusammenhang mit der Thätigkeit des Sehapparates zu bringen.

Ich habe bereits (in meiner Schrift „Elemente der reinen Empfindungslehre" Jena 1877) gezeigt, dass die Farbenempfindung eine Manigfaltigkeit von nur zwei Dimensionen ist. Sie kann nur intensiv und qualitativ sich verändern. Ich habe dargethan, dass nicht ausserdem noch die Sättigung sich ändern kann, sondern diese, wenn Intensität und Qualität gegeben sind, mit bestimmt ist, indem die Empfindung des Weisslichwerdens einer Farbe durch Intensitätszunahme entsteht und auf einem multiplicativen Processe beruht, während die Intensitätsänderung für sich additiv ist (a. a. O. § 24 bis 28 und § 43 bis 45). Die grössere oder geringere Intensitäts- oder Helligkeits-Empfindung hängt von der Stärke der Erregung in erster Linie ab, die Qualität von der

Frequenz der erregenden Schwingungen, oder, was fast dasselbe bedeutet, von der Schwingungsdauer.

Wesentlich verschiedene reine Helligkeitsempfindungen sind nur Weiss, Grau, Schwarz, wesentlich verschiedene einfache reine Farbenqualitäten nur Roth, Gelb, Grün, Blau. Diese Empfindungen und die wichtigsten sie verknüpfenden Uebergangs-, Misch- oder Zwischen-Empfindungen müssen einzeln erörtert werden.

§ 20. Die Helligkeitsempfindungen Schwarz, Weiss, Grau.

I. Schwarz heisst die schwächste Gesichts-Empfindung, welche bei schwächster Erregung vieler oder aller Nervenenden der Netzhaut durch innere Reize eintritt. Steigert sich die innere totale Reizung gleichmässig, dann wird die Empfindung weniger schwarz, d. h. Grau. Es kann durch inadäquate Reizung des geschlossenen Auges in der Finsterniss, z. B. durch Druck, durch rasche Raddrehung, wodurch ein sehr helles Phosphen in jedem Auge entsteht (entsprechend der Zerrung der Netzhaut durch die plötzliche Anspannung des Trochlearis) sogar reines Weiss hervorgerufen werden. Im ungereizten geschlossenen Auge entsteht aber niemals Weiss. Man kann nur jeden Augenblick die Empfindungen tiefes Schwarz und weniger tiefes Schwarz, nämlich Grau, welche stetig ineinander übergehen, ohne äussere adäquate Reize haben. Sie entsprechen dem Zustande der Netzhaut, welchen ich als ihre Eigenerregung bezeichnen will. Ist das ganze Gesichtsfeld gleichmässig tiefschwarz, dann ist die Eigenerregung gleichmässig minimal, ist an einer Stelle oder an mehreren Stellen des sonst gleichmässig tiefschwarzen Gesichtsfeldes Grau vorhanden, dann werden daselbst die Nervenenden durch gleichmässig gesteigerte Eigenerregung stärker erregt, beim Weiss, wie es auch zu Stande komme, noch stärker. Weiss ist die stärkste farblose Lichtempfindung. Dunkelheit ist nur geringe Helligkeit.

II. Genau das Grau, welches bei Eigenerregung der Netzhaut auftritt, wird hervorgerufen durch äussere adäquate Reize, indem bei gleichmässiger totaler Erregung durch Lichtstrahlen jeder Wellenlänge zugleich, wenn die Lichtmenge gross ist, Weiss, wenn sie gering ist, Grau, wenn sie minimal ist, Schwarz empfunden wird. Im letzteren Falle ist die Reizung unterschwellig, d. h. schwächer als die der Eigenerregung zu Grunde liegende.

III. Das mittlere Grau, welches ebensoweit vom hellsten Weiss wie vom tiefsten Schwarz absteht, entspricht dem Indifferenzpunct der continuirlich veränderlichen Empfindungs-Intensität, welche steigt und fällt mit der objectiven Erregung, wie mit der Eigenerregung der Netzhaut.

§ 21. Abhängigkeit der Farbenempfindungen von der Netzhauterregung.

IV. Jede Farbenempfindung ist die Resultirende aus der (durch die Eigenerregung der Netzhaut z. Th. gegebenen) Intensitäts-Empfindung des Lichtes und der durch die Erregung der Nervenenden der Netzhaut mittelst der objectiven Lichtstrahlen von gewisser Wellenlänge gegebenen Qualitäts- und Intensitäts-Empfindung des Lichtes, indem die langwelligen Lichtstrahlen die Empfindung einer warmen Farbe (Braun, Roth, Gelbroth, Gelb, Grüngelb), die kurzwelligen die Empfindung einer kalten Farbe (Grünblau, Grün, Blau, Rothblau) zu Stande kommen lassen.

V. Da thatsächlich die Empfindung warmer Farben nach Erregung durch langwellige Lichtstrahlen zu Stande kommt, diese aber stetig in kurzwellige übergehen, so muss es Lichtstrahlen von einer mittleren Wellenlänge geben, ich nenne sie mittelwellige, welche zwischen die am wenigsten kalte und die am wenigsten warme Farbe (Gelbgrün und Grüngelb) fallen oder dem Indifferenzpunct der Farbentemperatur, d. h. der Farbenqualität, entsprechen. Von diesem ausgehend wird erst eine Farbe für kalt und für warm (mit ab- und zunehmender Wellenlänge des erregenden Lichtstrahles) erklärt. Diese Stelle ist die hellste im continuirlichen Spectrum, und geht am leichtesten in Weiss über bei zunehmender Lichtstärke.

VI. Wenn sehr kurzwellige und sehr langwellige Strahlen dieselbe Netzhautstelle treffen, so dass eine warme und kalte Farbenempfindung zusammen entstehen, dann hat man beide zugleich (im Blauroth), d. h. eine gemischte Empfindung.

Es gibt demnach zwei Uebergänge von den warmen Farben zu den kalten, einen vom Roth durch Gelb, den Indifferenzpunct zwischen Grüngelb und Gelbgrün hindurch, zum Grün und dann Blau, einen anderen vom Roth unmittelbar zum Blau durch Purpur und Violett, d. h. durch Blauroth und Rothblau. Zwischen letzteren liegt also ein zweiter Indifferenzpunct entsprechend einer

Mischfarbe aus Roth und Blau, welche von beiden gleichweit abweicht und weder kalt noch warm ist. Die einzigen Farben, in welchen zugleich eine kalte und eine warme Farbe kenntlich bleiben, sind die aus Grün und Gelb und die aus Roth und Blau bestehenden.

VII. Wenn aber ein kurzwelliger und ein langwelliger Lichtstrahl zugleich dieselbe Netzhautstelle treffen, so wird allemal die Eigenerregung dieser Stelle gesteigert, es entsteht in jedem Falle Grau oder Weiss (je nach der Quantität der einfallenden Strahlen) und nur im Falle die partielle Erregung durch einen der beiden Strahlen stärker, als die durch den anderen bewirkte ist, wird ausserdem eine warme oder kalte Farbe, die der stärkeren Erregung entsprechende, empfunden. Sind beide Erregungen gleich stark, so kann Weiss oder Grau resultiren ohne farbige Beimischung und die beiden primären Lichtarten heissen dann complementär. Ist bei diesen die Erregung auf Seiten der warmen Farbe stärker, so resultirt gelbliches oder röthliches Grau oder Weiss, ist sie auf Seiten der kalten Farbe stärker, so resultirt grünliches oder bläuliches Grau oder Weiss.

§ 22. Charakteristik der einzelnen Licht- und Farben-Empfindungen.

Die einzelnen Licht- und Farben-Empfindungen kommen in folgender Weise zu Stande.

Schwarz entspricht dem Zustande der Netzhautruhe, d. h. minimaler Eigenerregung der Netzhaut ohne objective Reize, welche nur so lange sie unterschwellig sind, das Schwarz nicht stören. Schwarz entsteht demnach 1) im geschlossenen Auge durch Abnahme innerer Reize, 2) durch Abnahme der Oscillationsweite eines einwirkenden Lichtstrahls oder mehrerer beliebiger Wellenlänge, 3) durch Abnahme der Netzhauterregbarkeit wenn äussere Reize fehlen und die inneren nicht zunehmen. Ich nenne diese drei Veränderungen melanogen d. h. „die Empfindung Schwarz gebend." Diejenigen Reize, welche nur eine Helligkeitsempfindung geben, heissen photogene Reize, diejenigen Reize, welche ausserdem eine Farbenempfindung geben, heissen chromatogen.

Grau entspricht dem Zustande gesteigerter Eigenerregung der Netzhaut und entsteht: 1) durch Zunahme innerer und äusserer inadäquater Reize im geschlossenen Auge, 2) durch Einwirkung

eines Lichtstrahls jeder beliebigen Wellenlänge und nicht minimaler submaximaler Oscillationsweite, 3) durch Einwirkung eines Paares complementärer Lichtstrahlen oder mehrerer oder aller Paare auf dieselbe Netzhautstelle, also auch durch Einwirkung von Lichtstrahlen aller Wellenlängen zugleich, bei (nicht minimaler) submaximaler Oscillationsweite, 4) durch Zunahme der Erregbarkeit der Netzhaut bei geschlossenem Auge.

Alle diejenigen Veränderungen, welche die Empfindung Grau liefern, nenne ich poliogen.

Weiss entspricht dem Zustande maximaler Eigenerregung der Netzhaut und entsteht: 1) durch Zunahme inadäquater Reize, 2) durch Einwirkung eines Lichtstrahls beliebiger Wellenlänge, wenn dessen Oscillationsweite maximal wird, 3) durch Einwirkung eines Paares complementärer Lichtstrahlen (oder mehrerer oder aller Paare) auf dieselbe Netzhautstelle bei grosser Oscillationsweite der Componenten, und zwar gewöhnlich durch alle Paare, d. h. durch Einwirkung von Lichtstrahlen aller Wellenlängen zugleich bei grosser Oscillationsweite, 4) durch Zunahme der Netzhauterregbarkeit, auch wenn die Oscillationsweite in den vorgenannten Fällen gross, aber nicht maximal wird. Alle diejenigen Veränderungen, welche die Empfindung Weiss liefern, sollen leukogen heissen.

Roth entspricht einem Zustande submaximaler Erregung eines Theiles des chromatogenen Apparates im aufsteigenden, ich sage lieber im warmfarbigen oder anachromatischen Sinne und kommt zu Stande: 1) durch innere (pathische, toxische) und inadäquate objective (z. B. elektrische) Reize, 2) durch Einwirkung von Lichtstrahlen gewisser (grosser) Wellenlänge (678—686) und mittlerer Oscillationsweite, 3) nach Einwirkung der Complemente dieser Strahlen als negatives Nachbild, während derselben als Contrastfarbe. Unter keinen Umständen aber kann man reines Roth aus zwei oder mehreren anderen Farben zusammensetzen. Es ist auch von niemand eine solche Zusammensetzbarkeit der Farbe Roth behauptet worden. Sie ist eine Hauptfarbe, Urfarbe, Grundfarbe, Principalfarbe allen Theorien zufolge. Alle diese Farbe gebenden Veränderungen sollen erythrogen heissen.

Gelb entspricht einem Zustande submaximaler Erregung eines anderen Theiles des chromatogenen Apparates im warmfarbigen Sinne und kommt zu Stande: 1) durch innere und in-

adäquate objective Reize, 2) durch Einwirkung von Lichtstrahlen gewisser Wellenlänge (572—578) und grosser Oscillationsweite, 3) durch Einwirkung der Complemente dieser Strahlen als negatives Nachbild und Contrastfarbe. Es ist behauptet worden (namentlich von Young 1807 und 1860 von Maxwell) Gelb lasse sich aus Roth und Grün zusammensetzen, so dass man nicht ein fahles oder weissliches Gelb erhalte (Helmholtz 1852), sondern ein Gelb wie im reinen Spectrum. Ich selbst habe sogar bei meinen Versuchen über die Mischung der Spectralfarben (Ein neues sehr bequemes Verfahren zur Mischung homogener Farben im Bericht üb. d. 25. Generalversammlung des naturhistorischen Vereins der Preussischen Rheinlande und Westphalens in Bonn; Verhandlungen des Vereins 25. Jahrg. Bonn 1868, Correspondenzblatt S. 57.) das letztere bestätigt. Es ist aber bei späterer genauerer Prüfung der beiden Componenten über jeden Zweifel hinaus von mir festgestellt worden, dass entweder Rothgelb und Grün oder Roth und Gelbgrün oder gar Rothgelb und Gelbgrün die Componenten waren, so dass zwar Gelb durch die Vereinigung der complementären Farben Grün und Roth, aber zugleich Weiss entstand, zusammen also weissliches oder ungesättigtes Gelb. Nichtsdestoweniger ist die ältere Angabe, dieses Gelb sei von dem des Spectrum nicht zu unterscheiden gewesen, nicht unrichtig, nur bezieht sich dieselbe auf ein lichtstarkes Spectrum, in welchem alle Farben, und besonders Gelb, weisslich werden. In Wahrheit kann man Gelb nicht aus Farben zusammensetzen, welche es nicht schon enthalten und aus diesen erhält man niemals reines Gelb. Uebrigens ist auch die Empfindung des reinen Gelb nur möglich bei relativ grosser Intensität im Vergleich zur Intensität anderer reiner Farben. Denn lichtschwaches Gelb heisst Braun. Alle die Empfindung Gelb liefernden Veränderungen sollen xanthogen heissen.

Grün entspricht dem Zustande submaximaler Erregung eines dritten Theiles des chromatogenen Apparates im absteigenden, ich sage lieber im kaltfarbigen oder katachromatischen Sinne, und kommt zu Stande: 1) durch innere und inadäquate objective Reize, 2) durch Einwirkung von Lichtstrahlen gewisser Wellenlänge (510—516) und mittlerer Oscillationsweite, 3) durch Einwirkung der Complemente dieser Strahlen als negatives Nachbild und Contrastfarbe. Durch Mischung lässt sich Grün nur dann herstellen, wenn eine der beiden Componenten oder beide schon

Grün enthalten; so gibt Grünblau und Gelb, auch Grüngelb und Blau, sowie Grüngelb und Grünblau ein graues Grün, niemals aber reines oder gesättigtes Grün. Alle diejenigen Veränderungen, welche die Empfindung des letzteren geben, nenne ich chlorogen.

Blau entspricht dem Zustande submaximaler Erregung des vierten Theiles des chromatogenen Apparates im katachromatischen Sinne und kommt zu Stande: 1) durch innere und inadäquate objective Reize, 2) durch Einwirkung von Lichtstrahlen kleiner Wellenlänge (458—468) bei mittlerer Oscillationsweite, 3) durch Einwirkung der Complemente dieser Strahlen als negatives Nachbild und Contrastfarbe. Durch Mischung erhält man Blau nur dann, wenn in den Componenten, z. B. Grün und Violett, bereits Blau enthalten ist, und dieses künstliche Blau ist niemals rein, sondern weisslich. Alle die Empfindung Blau liefernden Veränderungen sollen glaukogen heissen.

Braun ist anachromatisch und entspricht zwar dem durch xanthogene Strahlen geringer Oscillationsweite hervorgerufenen Zustande, es ist dann dasselbe wie lichtschwaches reines Gelb (Helmholtz), aber eine Zusammenstellung sämmtlicher Farben, welche Braun genannt werden, seitens Farbenkundiger, zeigt, dass mit diesem Ausdruck viel mehr als nur dunkeles Gelb bezeichnet wird. Braun ist eine allgemeine Bezeichnung für warmfarbiges Licht, welches dunkeles Gelb enthält. Durch Zusammensein von zwei anachromatischen Farben geringer Helligkeit entsteht es leicht. Man erhält es auch in verschiedenen Nuancen (Tinten, Färbungen) durch Verdunkelung des isolirten spectralen Goldgelb, Orange, Grüngelb. Im rothen Spectrumende bei A ist aber gleichfalls Braun (Rothbraun) zu sehen, nicht nur für meine Augen, sondern auch für Listing und Ångström und andere. Es gibt ein Rothbraun, Gelbbraun, Orangebraun, Grünbraun (Dunkelgrüngelb), Schwarzbraun, aber kein Blaubraun. Manche finden die Spectralfarbe bei A, die der Kaliumlinie und die der Rubidiumlinien ($\lambda =$ ca. 795 und 780 nach Lecoq de Boisbaudran 1874, $A = 760{,}4$ und $Ka\ \alpha = 768$) mehr rothbraun als braun.

Rothgelb und Gelbroth oder Orange sind anachromatische Uebergangsfarben von deren Ursachen gilt was vom Roth und Gelb ausgesagt wurde, nur dass die Strahlen, welche sie liefern, zwischen den erythrogenen und xanthogenen Wellenlängen liegende Wellenlängen von 578 bis 678 haben, indem Röthlich-

gelb, Rothgelb, Gelbroth, Gelblichroth bei mittlerer Oscillationsweite, Rothbraun, Braunroth bei geringer und Schwarzbraun bei sehr geringer entstehen, durch gleichzeitige Erregung der erythrogenen und xanthogenen Netzhautelemente. Orange für sich ist die wärmste Farbe.

Blaugrün, Grünblau, katachromatisch, entsprechend Rothgelb. Eine Farbe zwischen Grünblau und Blaugrün, welche ebenso weit vom Blau wie vom Grün absteht, ist die kälteste Farbe von allen (vgl. § 30).

Blauroth, Rothblau sind unruhige Empfindungen, welche zwischen den Extremen der Anachromasie und Katachromasie hin- und herschwanken. Enthalten sie mehr Blau als Roth, so ist das resultirende Violett eine kalte Farbe, enthalten sie mehr Roth als Blau, so ist das resultirende Purpur eine warme Farbe. Nur ersterem entspricht ein homogener kurzwelliger Lichtstrahl, letzterem eine Combination von glaukogenen und erythrogenen Strahlen, bez. von gleichzeitigen Erregungungen glaukogener und erythrogener Netzhautelemente.

Gelbgrün, Grüngelb: gleichfalls schwankende Empfindungen, welche um den ersten Indifferenzpunct der Farbentemperaturlinie auf und ab schwanken, mit überwiegendem Grün katachromatisch, mit überwiegendem Gelb anachromatisch, so dass reinstes Gelbgrün und Grüngelb beidseitig im Indifferenzpunct aneinanderstossen. Ermittelt man nun die Wellenlänge des Lichtes, welches ebensoviel Gelb wie Grün enthält, so hat man die dem ersten Indifferenzpunct der Farbentemperatur entsprechende Wellenlänge. Für meine Augen beträgt dieselbe ungefähr 546 Milliontel Millimeter; sie scheint aber nicht immer denselben Werth zu haben.

§ 23. Einige Folgerungen.

Aus dem Bisherigen fliessen mehrere wichtige Folgerungen:

1) Alle Lichtstrahlen mit erheblich grösserer W-L als 546 liefern warme Farben, alle mit erheblich kleinerer kalte Farben. Hierdurch zerfällt das Spectrum in eine warme und kalte Hälfte.

2) Lichtstrahlen von nahezu 546 liefern die weder kalte noch warme Farbe zwischen Gelbgrün (kalt) und Grüngelb (warm).

3) Lichtstrahlen von zwei verschiedenen W-L liefern entweder farbige Empfindungen, in welchen beide Componenten erkennbar sind, Gelbroth, Gelbgrün, Blaugrün, Rothblau oder farblose Empfindungen, Weiss-Grau (complementäre Strahlen), in welchen die Componenten nicht direct erkennbar sind.

4) Bei gleichzeitiger Einwirkung complementärer Lichtstrahlen ist stets der eine kalt-, der andere warmfarbig.

5) Bei gleichzeitiger Einwirkung zweier nicht complementärer Strahlen ist in der geschlossenen Linie der Farbenempfindungen stets die resultirende Farbe zwischen den beiden Componenten gelegen (Rothgelb zwischen Roth und Gelb, Grünblau zwischen Grün und Blau, Grüngelb zwischen Grün und Gelb und Rothblau zwischen Blau und Roth); sie bildet demnach die Uebergangs-Empfindung von der einen Componente zur anderen oder ist eine Zwischen-Empfindung (Mischempfindung).

§ 24. Veranschaulichung des Zusammenhanges sämmtlicher Farben-Empfindungen.

Auf verschiedene Weise lassen sich alle diese Sätze graphisch veranschaulichen: Bezeichnen die Puncte einer Kreislinie die Farben-Empfindungen in gleicher Helligkeit und das Centrum derselben intensivstes Weiss, der äussere Ring dagegen Schwarz, so stellen die Radien alle Uebergänge der Farben vom tiefsten Schwarz durch die Farbe hindurch zum blendenden Weiss dar, wie es vollkommen der Beobachtung entspricht. Schreitet man vom schwarzen Ring anfangend auf einem beliebigen Durchmesser vorwärts, so kommt man ohne Rücksichtnahme auf irgend welche Farbe durch Schwarzgrau, Grau, Weisslichgrau, Grauweiss zum Weiss, indem die minimale Eigenerregung der Netzhaut gleichmässig bis zum Maximum gesteigert gedacht wird. Ist eine innere in sich geschlossene krumme Linie das Bild der reinen Farbenempfindungen, so liegen auf denselben Durchmessern die leukogenen, bez. poliogenen Farbenpaare. Diese vertheilen sich in vier Zirkel:

schwarz		schwarz	
dunkelroth	dunkelgrün	gelbbraun braungelb	dunkelblau
roth	grün	gelb	blau
hellroth	hellgrün	hellgelb	hellblau
röthlichweiss	grünlichweiss	gelblichweiss	bläulichweiss
weiss		weiss	

schwarz		schwarz	
rothbraun braunroth	dunkelgrünblau dunkelblaugrün	braungrün grünbraun	dunkelblauroth dunkelrothblau
rothgelb gelbroth	grünblau blaugrün	grüngelb gelbgrün	blauroth rothblau
hellrothgelb hellgelbroth	hellgrünblau hellblaugrün	hellgrüngelb hellgelbgrün	hellblauroth hellrothblau
gelblich-röthlich-weiss	bläulich-grünlich-weiss	grünl.-gelblich-weiss	röthlich-bläulich-weiss
weiss		weiss	

Andere als diese complementären Farben sind nicht bekannt. Zur Verdeutlichung dienen noch folgende Gleichungen:

orange = rothgelb; gelbroth; olivengrün = braungrün
citronengelb = hellgrüngelb; violett = rothblau
rosa = hellblauroth; purpur = blauroth.

Das Complement ist zugleich die Contrastfarbe und die Farbe des negativen Nachbildes. Hierbei ist überall nur die Empfindung, nicht der objective Reiz gemeint.

Sollen die Farbenqualitäten allein ohne Rücksicht auf ihr Weisslich- und Schwärzlich-Werden dargestellt werden, so können dazu vier ungleichschenkelige congruente rechtwinkelige Dreiecke dienen, welche sämmtlich eine Kathete, und zwar die grössere, welche doppelt so gross ist, wie die kleinere, gemeinsam haben und in einer Ebene liegen (Figur II).

Links sind die warmen Farben Roth, Orange, Gelb oben, die kalten Grün, Blaugrün, Blau unten. Jede Farbe oberhalb der horizontalen Linie *ws* (Weiss) findet in dem gleichen Abstande von dieser unterhalb derselben ihr Complement (negatives Nachbild, Contrastbild), so dass die beide verbindende Gerade *ws* unter einem rechten Winkel schneidet und parallel *rgr* und *gebl* ist; so sind *r* und *gr*, sowie *ge* und *bl* complementär, ebenso wie *o* (orange) und *f* (eine Farbe zwischen Grünblau und Blaugrün). Um auch die beiden kritischen Farben Grüngelb und Blauroth mit in diese Darstellung zu ziehen, muss man die Dreiecke *wgrs* und *wgcs* zusammenfassen, wodurch alle Uebergangsfarben zwischen Grün und Gelb erhalten werden, und die Dreiecke *wrs* mit *wbl* combiniren,

wodurch alle Uebergänge von Roth zu Blau erhalten werden. Auch hier liegen die Complementärfarben (negativen und Contrast-Bild-Farben) auf den zu *ws* senkrechten Linien. Man übersieht aber bequemer die Complemente, wenn das rothe Dreieck mit dem grünen den Platz tauscht. Dann sind alle aus Grün und Gelb gemischten Farben oben allen aus Roth und Blau gemischten unten complementär, wie aus der Figur rechts zu entnehmen, wo die horizontale Linie das farblose Grau oder Weiss bedeutet.

§ 25. Die Orte der einzelnen Farben im Spectrum.

Um diejenigen Farbenempfindungen, welche beim Anblick eines möglichst reinen continuirlichen Spectrums eintreten, zugleich mit ihren Complementärfarben (und den mit diesen übereinstimmenden reinen Contrastfarben und negativen Nachbilderfarben) darzustellen, dient die Figur III, für deren Construction meine Bestimmungen der Orte des reinsten Roth, Gelb, Grün, Blau maassgebend gewesen sind (Jenaische Zeitschrift für Naturwissenschaft V. 370. 1870. Vergl. Chodin: Die Abhängigheit der Farbenempfindungen von der Lichtstärke. Jena 1877). Ich habe, seit sie veröffentlicht wurden, oft Gelegenheit gehabt, diese Zahlen zu prüfen und jedesmal bei Vermeidung zu grösser und zu geringer Lichtstärke des Spectrum Werthe erhalten, welche in die 1870 ermittelten Grenzen fallen. Danach liegt, wenn λ die Wellenlänge in Milliontel - Millimetern bedeutet und n die Schwingungszahl in Billionen in 1 Secunde,

	λ				n			
Ur-Roth	zwischen 678	und	686	zw.	440	und	435
Ur-Gelb	„ 572	„	578	„	521	„	516
Ur-Grün	„ 510	„	516	„	585	„	578
Ur-Blau	„ 458	„	468	„	651	„	637

Diese Bestimmungen gelten nur für eine einzige (mittlere), jeder Farbe eigene Lichtstärke und die isolirten Spectralfarben im sonst finsteren Raum und nur für das unermüdete Auge. Die erforderliche Lichtstärke ist im einzelnen Fall leicht herzustellen durch die Mikrometerschraube an der Spaltvorrichtung des Spectroskops bei Anwendung von Diaphragmen. Vor allem muss der Grund des Gesichtsfeldes oberhalb und unterhalb des Spectrum ebenso schwarz sein wie der Rand desselben, so dass man letz-

teren nicht erkennt. Sodann müssen qualitative Veränderungen eintreten, wenn die Lichtstärke sich ändert:

Es wird	bei Zunahme	bei Abnahme
Reinstes Roth	gelblich	bräunlich
„ Gelb	weisslich	bräunlich
„ Grün	weisslich	rein dunkelgrün
„ Blau	weisslich	rein dunkelblau.

Ich füge noch hinzu, dass der geringste Fehler in der Einstellung der vier Urfarben — beim Isoliren mittelst der Ocular-diaphragmen von 1 Millim. Spaltweite — sich sofort bei Aenderungen der Lichtstärke zu erkennen gibt. Es wird nämlich

	bei Zunahme	bei Abnahme
gelbliches Roth	röthlich-gelb	rothbraun
röthliches Gelb	goldgelb	gelbbraun
grünliches Gelb	hellgelb, weiss	gelbgrün, braungrün
gelbliches Grün	gelblich-weiss	bräunlich-grün
bläuliches Grün	bläulich-weiss	dunkel-blaugrün
grünliches Blau	weisslich-blau	grünblau
röthliches Blau	weisslic-hviolett	rothblau.

Ich bemerke hierbei, dass diese Versuche die Augen angreifen, wenn sie längere Zeit ohne Pausen fortgesetzt werden und dass mein Steinheilscher grosser Spectralapparat (mit 2 Prismen) die Fraunhofer'sche Linie b deutlich vierfach zeigte, namentlich b_3 und b_4 deutlich als zweifach erkennen liess. Versuche mit kleineren Apparaten können nicht genau ausfallen. Sowie man aber weiss, dass nur unreines Blau bei Intensitätsabnahme grünlich oder röthlich wird, nur unreines Grün ebendann bläulich oder bräunlich, nur unreines Gelb eben dann röthlich oder grünlich, so wird man die λ-Werthe für diese 3 Urfarben relativ leicht finden, indem man jedesmal dieselben isolirt und die Orte zuerst bei unsichtbarer Scala einstellt, dann die Scala erleuchtet und abliest. Ich benutzte manigfaltige Lichtquellen.

Jede Farbe hat eine, und nur eine Lichtstärke, bei welcher sie vollkommen frei von jeder Beimischung und satt erscheint. Nach einiger Uebung wird das Auge für die Auffindung dieser Lichtstärke ungemein empfindlich. Das nähere über die Aenderungen des Tons findet sich in der erwähnten Abhandlung von Chodin, welcher nach denselben Methoden, wie ich

selbst, in meinem Laboratorium arbeitete und vorzüglich farbentüchtige Augen besitzt. Dass reinstes Grün bei erheblicher Zunahme der Lichtstärke weisslich wird, oder ein Wettstreit zwischen bläulichem und gelblichem Weisslich-grün entsteht, sei hier noch besonders angemerkt.

Die farbigen Curven beziehen sich hiernach nur auf ein ideales Spectrum, in welchem die Lichtstärke so vertheilt ist, dass jede der vier Urfarben gleichweit von der anderen absteht und in dem ganzen Raume gleiche Abschnitte einnimmt (Fig. III).

Die positiven Ordinaten geben in willkürlichen Einheiten an, wie viel Roth, Gelb, Grün, Blau ein gutes Auge unter den genannten Bedingungen im Spectrum mittlerer Lichtstärke wahrnimmt, indem unmittelbar neben dem reinen Roth Gelb, neben diesem Grün, neben diesem Blau, neben diesem Violett beginnt. Die Horizontale enthält die Wellenlängen oder Schwingungszahlen, welche durch einige Fraunhofer'sche Linien bezeichnet sind. Die negativen Ordinaten geben die Contrastfarben an, welche mit den Gegenfarben identisch sind. Zugleich erkennt man aus ihnen unmittelbar die Farbe des negativen Nachbildes jeder einzelnen Stelle des Spectrum. Nach meinen Versuchen gibt es im Sonnenspectrum kein Roth, welches reines Grün im Nachbild lieferte, vielmehr ist dieses stets noch blaugrün und zwar noch bei dem isolirten Licht der Wellenlänge $\lambda = 795$ *Rb*, über welches hinaus ich kein Nachbild mehr erhalte. Aus der Beimischung des Blau zum Grün im negativen Nachbild auch des äussersten spectralen Roth folgt, dass diesem immer noch Gelb beigemischt ist. Das negative Nachbild vom Urgelb ist rein spectral-blau und auffallender Weise gibt das des isolirten reinsten Grün bei Anwendung von Sonnenlicht im sonst finstern Gesichtsfeld reines Roth, so zwar, dass dieses überraschend reine Roth im Spectrum nicht vorkommt. Gelbgrün gibt Blauroth, Blaugrün Gelbroth im Nachbild. Ich sehe hier Roth und Gelb öfters getrennt. Das Nachbild des reinsten Blau ist dunkelgelb, d. h. braungelb, ohne den geringsten röthlichen oder grünlichen Ton. Ich habe auch viele andere isolirte Spectralfarben in dieser Richtung geprüft und immer, vor 12 Jahren wie jetzt, gefunden, dass gelbrothe Uebergangsfarben blaugrüne Nachbilder geben, dass Gelbgrün im Nachbild Violett, Blaugrün Roth mit gelblichem Ton, Blauroth Grün mit gelbem Ton, Violett Gelb mit grünem Ton wird, wobei stets nur das Nachbild im völlig finsteren Gesichtsfeld gemeint ist.

Von den gewöhnlichen Angaben weicht also nur die rein rothe Farbe des negativen Nachbildes von ganz reinem Grün erheblich ab. Es ist aber ganz sicher, dass nur dann das negative Nachbild von Roth, sowie seine Complementärfarbe und seine Contrastfarbe, neben Grün Blau erkennen lässt, wenn das Roth gelblich war. Sowie das Roth nur eine Spur von Blau erkennen lässt, ist die complementäre (Contrast-, Nachbild-)Farbe nicht mehr bläulichgrün, sondern gelblichgrün. Es muss also zwischen bläulichem Roth und gelblichem Roth ein reines Roth geben, dessen Complement zwischen gelblichem Grün und bläulichem Grün die Mitte hält, d. h. rein grün ist. Diese einfache Deduction ist bisher übersehen worden, da man immer wieder behauptet, nicht Grün, sondern Blaugrün, sei das Complement von Roth und nicht Roth, sondern Purpur, das von Grün. Sämmtliche Nachbilder, die ich von isolirten Spectralfarben erhalte, sind höchst deutlich, man würde in der gewöhnlichen Terminologie sagen, gesättigt, und das Gesichtsfeld so schwarz, dass es keinen Unterschied ausmacht, ob ich das Auge schliesse und verdecke oder nicht. Mit Lampenlicht und farbigen Flammen, auch Magnesiumlicht können diese Versuche, von denen täglich nur kurze Zeit hindurch wenige anzustellen sind, sehr leicht angestellt werden, aber nur im sonst verdunkelten Raum, wenn man reine Resultate haben will. Mit Benutzung des Sonnenspectrum hat man (bei jeder Farbe) durch die zahlreichen Fraunhofer'schen Linien sofort die Wellenlängen der isolirten Farben und weitergehende Variation der Lichtstärke auch bei engem Spalte, aber mehr zerstreutes Licht bei Anwendung von mehr als einem Prisma. Der Diaphragmaschieber im Ocular kann zwar dieses Licht abblenden, nicht aber die Verunreinigung der isolirten Farbe durch dasselbe hindern.

§ 26. Das Spectrum des Rothgrünblinden und das des Blaugelbblinden.

Es ist nun von grosser Wichtigkeit, für jede Farbentheorie den erwähnten Einfluss der Aenderungen der Lichtstärke auf die Aenderungen der Spectralfarben zu kennen. Sie sind in Chodins Abhandlung beschrieben. Hier kommt es nur auf die Extreme an, die leicht zu verificiren sind.

Bei maximaler Intensität des Lichtes, wenn man das Spectroskop auf eine Stelle dicht am Rande der Sonnenscheibe einstellt,

besteht das Spectrum nur noch aus zwei Farben, Gelb und Blau, welche durch ein unerträglich blendend weisses Intervall zwischen D und $F\,{}^1\!/_2\,G$ getrennt sind. Nur gegen A hin wird das Gelb rothgelb. Von Roth, von Grün, von Violett ist nichts mehr zu erkennen und alles Blau ist weisslich-blau, zwischen F und $F\,{}^1\!/_2\,G$ blendend hell, alles Gelb blendend gelblichweiss.

Bei minimaler Intensität dagegen besteht das Spectrum nur aus Roth und Grün, welche bei kleinem Spectrum an der Stelle des Urgelb hart aneinanderstossen und bei grosser Dispersion einen schwachen Rest von Dunkelrothgelb oder Braungelb übrig lassen. Roth ist sehr stark verkürzt, Grün reicht weit über F hinaus. Von Blau und Violett ist nichts mehr zu erkennen.

Vergleicht man hiermit die Spectren der typisch-farbenblinden Augen, so ergibt sich eine bemerkenswerthe Uebereinstimmung. In der ersten Classe, bei Rothgrünblindheit, werden nur Gelb und Blau gesehen, welche durch einen schmalen grauen Streifen T getrennt sind, und in der anderen Classe, bei Blaugelbblindheit, wird, wie Holmgren entdeckte, nur Roth und Grün gesehen, welche durch eine Trennungslinie an einer anderen Stelle geschieden sind. Die farbigen Curven bringen dieses zur Anschauung (Fig. IV u. V).

Der Rothgrünblinde muss also das negative Nachbild von Braun, Roth, Gelb, Grüngelb, rein blau, nur ungleich hell, das von Blau, Grünblau, Violett, Purpur gelb oder braun sehen. In der That stimmen die Beobachtungen, die ich daraufhin an drei Rothgrünblinden anstellte, damit überein. Der eine nannte das Nachbild von Zinnober „hellblau“ und fand es identisch mit dem von Pariser Grün. Das Nachbild von Chromgrün fand er „sehr hell bläulich“, das von Ultramarin wurde „gelb“, das von Violett „gelb“, auch „gelblichbräunlich“ genannt, ebenso das von Grünblau. Die früheren Angaben dieses Rothblinden (A. H.) sind z. Th, weniger deutlich (Pflügers Arch. I, 320). Das „Rosenroth“ im Nachbild des Parisergrün und Zinnober muss Hellblau bedeutet haben, welches in der That oft ebenso bezeichnet wurde. Der andere Rothgrünblinde (H. S.) fand das negative Nachbild von Zinnober „blau“, von Mennige „schön blau“, von Ultramarin „schön roth“, von Violett „blassroth“. Hier bezeichnet „roth“ nichts anderes als „gelb“. Denn wenn ich dem Rothgrünblinden isolirtes spectrales Roth (bei B) zeige, so nennt er es „roth“ nur bei geringer Lichtstärke; sowie dasselbe farbige Feld eine Steigerung der Helligkeit

erfährt, wird es „gelb", „rein gelb" genannt. Ist ein und derselbe farbige intensive rothe Streifen (bei *B*) oben dunkel, unten hell, so wird er oben „roth", unten „rein gelb" gesehen. Der dritte Rothgrünblinde nennt das negative Nachbild von Purpur „gelb". Er sieht darin nur das Blau. Das Nachbild von Orange ist ihm „rein blau" ohne eine Spur von Beimengung. Lasse ich den typisch Rothgrünblinden reinstes spectrales- oder Pigment-Grün, das er „rein grau" nennt, anhaltend fixiren, so gelingt es ihm nicht, ein farbiges Nachbild zu erhalten. Auch grüne Papierquadrate, die er grauen Papierquadraten völlig gleichstellt, geben trotz redlicher Bemühungen kein farbiges Nachbild, während blaue auf demselben grauen Grunde nach einer halben Minute „gelb" werden und schon vorher „gelbe" Ränder erhalten. Die Nachbilder isolirter Spectralfarben ebenso. Uebrigens sind derartige Versuche an einseitig Rothgrünblinden und Blaugelbblinden dringend wünschenswerth. Das Nachbild muss dabei im dunkeln Gesichtsfelde beobachtet, nicht allein auf Grau projicirt werden, weil dabei der Contrast stören kann. Bei Blaugelbblinden müssen Roth und Gelbroth im negativen Nachbild grün, dagegen Grüngelb, Gelbgrün, Blaugrün, Grün im Nachbild roth erscheinen, und reines Gelb (= Grau) und Blau werden keine farbigen Nachbilder geben. In der That stimmen Holmgrens Beobachtungen an seinem unilateral Blaugelbblinden, wie er mir freundlichst brieflich mittheilte, nachdem ich dieses niedergeschrieben hatte, hiermit ziemlich überein. Nur wird das Nachbild von Gelb „grün" und das von Blau „roth" genannt. Ohne Zweifel war das Gelb Goldgelb, also röthlich, das Blau Cyanblau, also grünlich. Grüngelb und Violett gaben farblose Nachbilder. Das „Grüngelb" muss dem Gelb sehr nahe stehen.

Sowohl für das farbentüchtige wie das partiell typisch farbenblinde Auge gilt, dass die algebraische Summirung der ihm entsprechenden farbigen Curven der Diagramme an jedem Puncte des Spectrum Weiss oder Grau gibt, indem die negativen Ordinaten nicht allein die Farben im negativen Nachbild, sondern zugleich die Gegenfarben bezeichnen, welche, wenn sie zugleich an derselben Netzhautstelle auftreten, Grau oder Weiss geben. Diese Farben sind die sich fordernden in der Göthe'schen Ausdrucksweise, welche in ästhetischer Beziehung Recht hat, obwohl jene Farben sich physiologisch vielmehr ausschliessen (an derselben Netzhautstelle), als fordern.

Bevor ich nun die Gesammtheit der von normalen und typisch farbenblinden Augen empfindbaren Farben mit den Erregungen der Netzhautelemente in bestimmteren Zusammenhang bringe, muss ich eine Reihe von Erfahrungen über den Temperatursinn mittheilen, welcher in mehrfacher Beziehung mit dem Farbensinn übereinstimmt und ihn verstehen hilft.

V. Die Empfindungen der Haut und Netzhaut verglichen.

§ 27. Der Farbensinn ein höchst verfeinerter Temperatursinn.

Ich habe nicht ohne Absicht von warmen und kalten Farben gesprochen, obwohl diese Bezeichnungen meistens nur auf die mit den Farbenempfindungen verbundenen Gefühle bezogen und mehr von Künstlern als von Physiologen gebraucht werden, doch lässt sie auch Donders gelten. Wem diese Ausdrücke einen Nebensinn zu enthalten scheinen, der kann sie durch „aufsteigend und absteigend“, „hoch und tief“ ersetzen. Ich lege auch darauf kein Gewicht, dass man die neuen Wörter „anachromatisch und katachromatisch oder „warmfarbig und kaltfarbig“ bevorzuge, aber es steht fest, dass nicht nur der Maler, sondern jeder normaläugige Mensch von selbst ihnen entsprechende Verschiedenheiten der Farbenempfindung hat. Von dieser fundamentalen Thatsache gehe ich aus. Roth und Gelb sind einander näher verwandt, als Roth und Grün; Blau und Grün sind einander näher verwandt, als Blau und Gelb. Die Empfindung benachbarter Gegenfarben ist eine ganz andere, als die benachbarter warmer oder benachbarter kalter Farben für sich. Die warmfarbigen Empfindungen haben einen dem der kaltfarbigen entgegengesetzten Charakter. Geradeso sind nun die Empfindungen der Hauttemperatur einander entgegengesetzt.

Je mehr man die Temperaturempfindungen mit den Farbenempfindungen vergleicht, um so grösser wird die Uebereinstimmung beider gefunden. Ich bin zu dem Endergebniss gelangt, dass der Farbensinn sich aus dem Temperatursinn entwickelt hat und als ein höchst verfeinerter und auf eine höchst empfindliche Nervenausbreitung, nämlich die Netzhaut, eingeschränkter Temperatursinn aufzufassen ist. Denn wenn alle bisher als Eigenthümlichkeiten der Farbenempfindungen bezeichneten allge-

meinen Eigenschaften derselben und die Bedingungen ihres Zustandekommens, ausser der nicht mehr auflösbaren Thatsache des Farbigen als solchen im Bewusstsein, ihr vollständiges Correlat im Gebiete der Temperaturempfindungen finden, dann wird man eine solche Coincidenzen-Reihe nicht mehr als nur zufällig ansehen oder als eine oberflächliche Analogie unbeachtet lassen dürfen. Es handelt sich dann um eine wesentliche neue physiologische Erkenntniss. Wenn man in dem Auftreten von Pigmentflecken an der Oberfläche niederer sonst farbloser Thiere die erste Stufe zur Localisirung der Wärme- und der Licht-Empfindung sieht, wegen stärkerer Absorption (G. Jäger), indem dieses Wärmeauge das Warm und Kalt, Hell und Dunkel besser unterscheide, als die umgebende übrige Haut (Häckel), so kann ich einem solchen (mir übrigens erst nach vorläufigen Mittheilungen dieser Arbeit in der Jenaischen medicinisch-naturwissenschaftlichen Gesellschaft bekannt gewordenen) Aperçu nur beistimmen. Es enthält aber keine Andeutung darüber, wie die der Farbenempfindung dienenden Theile aus den der Temperaturempfindung dienenden Theilen sich differenzirt haben können. Hier kommt es auch darauf nicht an, sondern auf die bisher nirgends hervorgehobene Analogie der Temperatur- und Farbenempfindungen.

§ 28. Der Temperaturzirkel und Farbenzirkel.

Zunächst behaupte ich, dass die continuirliche in sich zurücklaufende Reihe der Farbenempfindungen der continuirlichen in sich zurücklaufenden Reihe der Temperaturempfindungen analog ist. Gerade wie bei den Farben kann man bei den Temperaturen stets auf zwei Wegen von einer zur andern gelangen, aufsteigend oder absteigend. Ich setze als Anfangspunct diejenige Hauttemperatur, welche weder als kalt, noch als warm empfunden wird. Sie soll neutral heissen. Sie entspricht dem Neutralpunct der Temperaturempfindungslinie (vgl. meine Schrift „Elemente der reinen Empfindungslehre". Jena 1877. S. 16), von dem wir nicht sagen können, er sei kühl oder warm, von dem wir aber, sowie irgend eine Hautstelle erwärmt oder abgekühlt worden ist, sagen, er sei wärmer oder kälter als diese. Wir sind an den gewöhnlichen Hautzustand so lange gewöhnt, dass wir die gewöhnliche Hautwärme nicht mehr als besondere Temperaturempfindung bezeichnen, vielmehr von ihr aus erst Aenderungen derselben

beurtheilen. Geht man nun vom Neutralpunct aus aufwärts, so ist es sehr leicht, die Empfindung der Wärme im engeren Sinne mittelst des Thermometers abzugrenzen, einerseits von dem nur Lauwarmen dicht oberhalb des Indifferenzpunctes, andererseits von dem Heissen. Sowie nämlich das mit der Wärmeempfindung verbundene Lustgefühl, mit wachsender Temperatur wachsend, einen gewissen Grad erreicht hat, welcher die Blutwärme erheblich überschreitet, dann beginnt bei weiterer Temperatursteigerung der Charakter der Wärmeempfindung sich zu ändern. Es tritt ein Prickeln und Stechen ein und zwar innerhalb einer Secunde, wenn ich 79° C. erwärmtes Quecksilber mit dem Finger berühre, ebenso schnell in Wasser von ungefähr derselben Temperatur, langsamer (in etwa 4 Secunden) beim Eintauchen in Wasser oder Quecksilber von 60°, noch langsamer bei 55°. Diese Temperaturempfindung ist die der Hitze und stets mit Unlustgefühl verbunden. Steigt die Temperatur der Haut noch mehr, dann wird die Empfindung des Heissen und des Stechens immer schmerzhafter, die Temperaturempfindung undeutlicher, und es tritt schliesslich ein Moment ein, wo man nicht sagen kann, ob man überhaupt noch Hitze empfindet, während das Stechen immer deutlicher geworden ist. Wenn man nun vom Neutralpunct abwärts durch die am Thermometer begrenzbare Empfindung des Kühlen zum Kalten fortschreitet und die Kälteempfindung bis zum Schmerz wachsen lässt, dann tritt ebendasselbe Stechen ein, gleichfalls ohne Zerstörung der Epidermis, Steifheit oder sonstige dauernde Nachwirkung. Berühre ich z. B. mit dem neutralen Finger auf — 10° C. abgekühltes Quecksilber, dann fühle ich das Prickeln mit unmittelbar darauffolgendem Stechen nach weniger als 15 Secunden ungemein deutlich. Viele Minuten lang bleibt hierauf die Hautstelle kalt, tauche ich aber den Finger sogleich nach jener Abkühlung (während etwa 30 Secunden) in Wasser von 70°, dann hört augenblicklich die Kälteempfindung, welche überhaupt nur an den Grenzen der Berührungsfläche rein war, auf, und das Stechen dauert fort, so dass ich nicht im Stande bin, zu sagen, ob die fragliche Hautstelle kalt oder heiss ist, während das stechende Gefühl prävalirt. In zahlreichen Fällen, z. B. beim Anfassen sehr kalten Eisens, von dem man nicht weiss, ob es sehr kalt oder sehr heiss ist, vermag man bekanntlich nicht zu sagen, ob man enorme Hitze oder enorme Kälte empfindet.

Eine rasche Berührung mit einer sehr heissen Nadelspitze ist von einer solchen mit einer sehr kalten nicht zu unterscheiden, die Berührung aber sehr deutlich.



Die beiden Zirkel veranschaulichen die Uebereinstimmung der angeführten Thatsachen mit denen des Farbengebietes. Im continuirlichen Spectrum von mittlerer Lichtstärke kann man mittelst des Ocularspalts eine zwischen Gelbgrün und Grüngelb gelegene Stelle isoliren, die hellste Stelle im Spectrum, welche weder warmfarbig noch kaltfarbig ist (§ 21 V), sofort aber als kalt bezeichnet wird, wenn daneben Roth erscheint und als warm, wenn Blau auftritt. Von diesem ersten Indifferenzpunct der Farbentemperatur aus gelangt man in bekannter Weise durch Gelb, Gelbroth, Roth, Purpur zu einer Farbe, welche wiederum weder als kalt noch als warm bezeichnet werden kann, und welche genau zwischen Roth und Blau, nämlich zwischen Violett und Purpur, die Mitte hält. Sie entspricht der Empfindung, in welcher weder Farbenwärme noch Farbenkälte überwiegt. Hier liegt der zweite Neutralpunct. Andrerseits gelangt man vom ersten Neutralpunct der Farbentemperatur durch Grün und Blau zu eben jenem zweiten Neutralpunct.

Hierbei ist besonders zu beachten, dass die Empfindungen heiss und kalt geradeso verschieden von einander sind und geradeso durch Uebergangs- oder Zwischen-Empfindungen miteinander zu einer stetigen Reihe verbunden sind, wie die Empfindungen der Farben-Wärme und -Kälte im Gelbroth und Grünblau. Dass bei den extremen Temperaturempfindungen Schmerz auftritt, kann die Analogie nicht abschwächen, weil es sich in jedem Falle nur um die Deutlichkeit der Temperaturempfindung handelt.

§ 29. *Die Temperaturcontraste und Farbencontraste.*

Die zweite Uebereinstimmung zeigt sich, wenn man die *Farbencontraste* mit den *Temperaturcontrasten* vergleicht. Es gibt in beiden Fällen successive und simultane Contraste.

Der *successive Temperaturcontrast* tritt auf, wenn eine Hautstelle stark erwärmt oder abgekühlt worden ist. Nach Beendigung der Erwärmung oder Abkühlung bleibt zunächst eine positive oder gleichsinnige Nachempfindung zurück. Der warm gehaltene Finger bleibt nach dem Aufhören der Temperatursteigerung (durch Wärmezufuhr oder Behinderung seiner gewöhnlichen Wärmeabgabe) noch eine Zeitlang warm, der kalte unter entsprechenden Umständen kalt. Diese Erscheinungen correspondiren *positiven* Nachbildern der Farben. Wenn man aber weiter beobachtet, dann bemerkt man leicht, dass regelmässig die kalte Haut wieder warm, die warme kalt wird, indem die positive Nachwirkung schwindet. Taucht man während dieser Zeit den etwa durch Berühren von — 3° C. kaltem Quecksilber abgekühlten Finger in Quecksilber von genau der Hauttemperatur seiner nicht abgekühlten Partie, dann erscheint dieses Quecksilber sofort sehr deutlich warm, der gleich wieder herausgenommene Finger fühlt sich aber mit der anderen Hand kalt an. War dagegen der Finger durch Eintauchen in 40° warmes Quecksilber erwärmt worden, dann erscheint das Quecksilber von gerade der früheren Hauttemperatur sehr deutlich kühl, der Finger selbst noch warm. Dieses Warmempfinden der kalten, Kaltempfinden der warmen Haut ist eine Erscheinung des successiven Temperaturcontrastes und gleicht dem Auftreten der kalten Farbe im geschlossenen Auge an der vorher durch warmfarbige Lichtstrahlen stark erregten Netzhautstelle. Das positive Nachbild von Gelb ist Gelb, ist aber eine Netzhautstelle durch xanthogene Strahlen stark erregt worden, welche plötzlich aufhören zu wirken, so wird nicht nur ein schnell vorübergehendes gelbes Nachbild, sondern sehr bald ein blaues, d. h. kaltfarbiges gesehen, indem die Netzhaut erst allmählich zum Ruhezustand zurückkehrt, und während dieser Rückkehr erscheint auf der betroffenen Netzhautregion farbloses Licht kaltfarbig, nämlich blau, wenn Gelb, grün wenn Roth zuerst empfunden wurde. War dagegen der erste Eindruck kaltfarbig, dann erscheint farbloses Licht nachher warmfarbig. War es Blau, das zuerst stark empfunden ward, so

erscheint nun alles Farblose (Grau, Weiss, Schwarz) braun oder gelb, war es Grün, so erscheint alles Farblose nun roth u. s. w. ganz entsprechend den Temperaturempfindungen der Haut. Die zuerst heisse Hautstelle (warmfarbige Netzhautstelle) macht gleichsam nachher indifferente Objecte (Farbloses), entschieden kühl (kaltfarbig), die zuerst kalte Hautstelle (kaltfarbige Netzhautstelle) ebendieselben warm (warmfarbig), lässt also eine ungleiche Temperaturempfindung entstehen bei demselben sonst indifferenten (melanogenen oder poliogenen oder leukogenen) Reiz. Dass die positiven und negativen Nachempfindungen der Haut in der Regel länger dauern, als die der Netzhaut, ist nur ein gradueller Unterschied, welcher mit der grossen Trägheit der Haut, im Vergleich zur Empfindlichkeit der Netzhaut, zusammenhängt.

Der simultane Contrast auf dem Gebiete der Temperaturempfindungen ist, wie es scheint, früher nicht aufmerksam beobachtet worden, aber leicht zu zeigen. Wenn eine Hautstelle sehr stark abgekühlt wird, dann empfindet man die daran grenzenden Stellen lauwarm. Die Temperatur eines die Haut berührenden Objectes, welche unter gewöhnlichen Verhältnissen eine neutrale Empfindung liefert, wird als kühl bezeichnet, wenn die Temperatur der Haut an einer benachbarten Stelle erheblich zunimmt. Einige entscheidende Versuche mögen zum Beweise dienen. Man nehme zwei Platintiegel, einen grösseren und einen kleineren, fülle den grösseren mit Quecksilber von — 10° C., den kleineren mit Quecksilber von gerade der Temperatur des Handtellers, stelle den kleineren auf den Handteller und überzeuge sich, dass er nicht im geringsten lauwarm oder laukühl ist, dann setze man den kalten Tiegel auf denselben Handteller, ohne dass er den neutral temperirten berührt. Mit einem Male wird dieser sehr deutlich lauwarm, sogar nach einigem Zuwarten deutlich warm. Und umgekehrt. Man fülle, statt mit kaltem, den grösseren Tiegel mit 50° C. warmem Quecksilber und wiederhole den Versuch. Jetzt wird der kleinere Tiegel mit einem Male sehr deutlich kühl empfunden. Der Erfolg ist frappant und zwar für andere nicht weniger, als für mich. Man kann aber noch bequemer den simultanen Temperaturcontrast zeigen. Drückt man nämlich mit dem Handteller auf zwei Metallflächen (Griffe von Gewichten) mit etwa 4 Quadratcentimeter Oberfläche und 2 Centimeter Abstand gleich stark und ohne Verschiebungen, dann empfindet man die Stelle der Haut zwischen

den beiden abgekühlten Flächen sehr deutlich warm und findet sie sogar nachher noch, wenn man sie mit einem Finger der anderen Hand berührt, nicht nur viel wärmer, als die beiden abgekühlten Flächen, sondern sogar merklich wärmer, als andere weiter abgelegene Hautstellen. Hier ist also in unzweideutiger Weise dargethan, dass die Haut bezüglich der simultanen Temperaturcontraste sich ganz wie die Netzhaut bezüglich der Farbencontraste verhält. Denn wenn man eine kleine farblose Fläche neben einer grösseren warmfarbigen auf der Netzhaut hat, empfindet man erstere kaltfarbig. Ist die grössere kaltfarbig, dann erscheint die kleinere farblose warmfarbig. Die sogenannte „Täuschung" verschwindet nach Entfernung der inducirenden Eindrücke im Auge, wie auf der Haut. Dass es sich aber nicht um Täuschungen, sondern objective Erregungsdifferenzen handelt, zeigt die objective Veränderung der nicht direct betroffenen Hautstelle.

§ 30. Die complementären Temperaturen und Farben.

Besonders charakteristisch für das Farbengebiet sollen die complementären Paare sein. Aber auch diese fehlen dem Temperaturempfindungs-Apparat nicht.

Nennt man das nervöse Gebilde, dessen Erregung eine Temperaturempfindung setzt, den thermothetischen Apparat (da der Ausdruck thermogen schon vergeben ist), so ist zuvörderst einleuchtend, dass eine thermothetische Nervenfaser nicht ungetheilt vom Centralorgan in die Haut geht. Vielmehr ist die Theilung der Hautnervenfasern nachgewiesen. Nehme ich nur eine dichotomische Theilung an, so ist schon der Fall verwirklicht, dass, wenn ein peripheres Ende erwärmt und zugleich das andere abgekühlt wird, die thermothetische Faser jenseits der Theilungsstelle zugleich von zwei verschiedenen Temperatur-Erregungen betroffen wird. Sind beide Erregungen gleich stark, dann wird also weder Wärme noch Kälte empfunden werden. Entweder muss dann eine algebraische Summirung beider Erregungen stattfinden, oder es müssen beide Erregungen so rasch in der thermothetischen Nervenfaser miteinander abwechseln, dass keine von beiden allein zur Geltung kommt. In jedem Falle kann die eine periphere Zweigfaser dem Kältereiz besser angepasst, die andere dem Wärmereiz besser angepasst sein oder beide periphere Zweigfasern kön-

nen durch beiderlei Reize gleich leicht erregt werden. Ich behaupte nur, dass es jenseits der Theilungsstelle eine und dieselbe Nervenfaser sein muss, welche Kälte- und Wärme-Empfindungen vermittelt. Auch Hering (in den Sitzb. der k. Ak. der Wissensch. zu Wien. März 1877. 85. Bd.) nimmt nur éinen Apparat für Kälte und Wärme an, aber ohne die Theilung der peripheren Fasern zu berücksichtigen, welche eine periphere, functionelle Sonderung ermöglicht. Wenn also der thermothetischen Faser jenseits der Theilungsstelle ebenso viel Wärme-Erregung wie Kälte-Erregung zugeführt wird, dann kann sie keine andere Temperaturempfindung geben, als die neutrale, welche wir haben, wenn wir weder frieren noch uns warm fühlen, also diejenige, welche zu Stande kommt, wenn die vom Blutstrom gelieferte Wärmemenge geradeso gross ist, wie die durch die Haut in derselben Zeit nach aussen abgegebene Wärmemenge. Stellt man sich nun vor, dass ein thermothetisches Element auf irgend eine Weise mehr erwärmt wird, dann erscheint es nothwendig, eine entsprechend gesteigerte Wärmeentziehung zu vermeiden (es sei denn, dass die Erwärmung abermals gesteigert werde), falls eine Wärmeempfindung zu Stande kommen soll, und nothwendig, im Falle Kälte empfunden werden soll, die dazu erforderliche Abkühlung des thermothetischen Elements nicht durch Erwärmung (es sei denn, dass noch mehr abgekühlt werde), zu neutralisiren. Lassen wir also auf ein und dieselbe Hautstelle zugleich wärmeentziehende und erwärmende Einflüsse wirken, so müssen sie sich zwar compensiren und die ursprüngliche (neutrale) Temperatur zum Vorschein kommen lassen, wenn sie in einer bestimmten Grössenbeziehung zu einander stehen, aber es können dennoch die beiden ihnen entsprechenden Nerven-Erregungen in das Centralorgan gelangen. Dasselbe gilt für warmfarbige und kaltfarbige Netzhauterregungen, welche, wenn sie zugleich auftreten, nur farblose Empfindungen übrig lassen, aber schon durch die Thatsache ihrer binocularen Vereinigung zu Grau die Möglichkeit gesonderter Fortpflanzung jenseits der Netzhaut kund thun. Diese Beziehungen lassen sich für Temperatur- und Farben-Empfindungen durch ein Zahlenbeispiel veranschaulichen. In der wärmsten (Farben- und Temperatur-)Empfindung ist die Kälte minimal, in der kältesten ist sie maximal und die Wärme minimal. Man kann daher setzen:

	gelb-roth	roth	blau-roth	farb-los	gelb-grün	grün	blau-grün
Farbenkälte	— 1	— 2	— 3	— 4	— 5	— 6	— 7
Farbenwärme	+ 7	+ 6	+ 5	+ 4	+ 3	+ 2	+ 1
	roth-gelb	gelb	grün-gelb	farb-los	roth-blau	blau	grün-blau.

Rothgelb oder Gelbroth (streng genommen ein Orange genau zwischen beiden) ist nämlich darum die wärmste Farbe, weil sie die einzige ist, welche unmittelbar in zwei warme Hauptfarben (Roth und Gelb) übergehen kann. Sie steht also von den kalten Farben am weitesten ab. Ebenso ist die Farbe zwischen Grünblau und Blaugrün die kälteste Farbe, weil sie die einzige ist, welche unmittelbar in zwei kalte Hauptfarben (Grün und Blau), von denen sie gleichweit absteht, übergehen kann. Reines Blau ist so kalt nicht, weil es unmittelbar in Rothblau, welches durch das Roth wärmer ist, übergehen kann. Also bilden die Mittelpuncte zwischen Roth und Gelb und zwischen Grün und Blau die Extreme der reinen Farbentemperatur. Jedenfalls ist für alle normalen Augen Orange wärmer als Gelb, und Grünblau kälter als Blau, auch Gelbroth noch wärmer als Roth, und Blaugrün noch kälter als Grün. Reinstes Roth und reinstes Gelb sind gleichwarm, reinstes Grün und reinstes Blau gleich kalt, denn man gelangt vom Roth aus nicht schneller und nicht langsamer zur kältesten und wärmsten Farbe, als vom Gelb aus, und Blau steht von der kältesten wie von der wärmsten Farbe geradeso weit ab, wie Grün (vgl. den Farbenzirkel in § 28). Gewöhnlich nennt man Roth nur darum wärmer als Gelb, weil es farbiger (weniger weisslich) ist, das Braun ist aber ebenso warm wie Roth; auch ist Blau nur dann kälter als Grün, wenn es heller (weisslicher) ist. Grünliches Weiss und bläuliches Weiss von gleicher Lichtstärke sind gleich kalt, wenn alle Contraste fehlen.

Man übersieht nun leicht, dass, wenn die Summe der Erwärmungen eines Paares gleich ist der Summe der Abkühlungen desselben, Neutralisation der Farben, wie der Temperaturen eintreten muss. Z. B. ein Orange habe $6^1/_2$ Wärme und $1^1/_2$ Kälte und zum Complement ein Cyanblau mit $1^1/_2$ W. und $6^1/_2$ K., so ergibt sich 8 W. und 8 K., d. h. Farblosigkeit. Blau hat 2 W. und 6 K., seine Gegenfarbe Gelb 6 W. und 2 K., woraus im Ganzen wieder 8 W. und 8 K. sich ergeben. Ebenso neutralisiren sich

Grüngelb und Rothblau, sowie Roth und Grün, nicht aber 2 Farben, welche zusammen eine neue Farbe geben. Wie die Farben, verhalten sich die Temperaturempfindungen. Z. B. sei die Erwärmung bei der Empfindung „kalt“ 1, die Abkühlung 7 und es trete eine Empfindung „heiss“ mit der Erwärmung 7 und Abkühlung 1 dazu, so resultirt die neutrale Temperaturempfindung. Ein solches Heiss und Kalt sind also complementär wie Gelbroth und Grünblau.

Es bedarf kaum der Bemerkung, dass die Ziffern keine andere Bedeutung haben, als die, ein Beispiel zu liefern, wie man die Gegensätzlichkeit der complementären Temperatur-Empfindungen veranschaulichen kann. Es ist aber keineswegs unmöglich, experimentell die Wärme und Kälte in einer Farbe wie in einer Temperaturempfindung zu bestimmen. Hier sei noch hervorgehoben, dass die gleichzeitige Einwirkung eines Kälte- und Wärme-Reizes auf die Haut sich sehr leicht erreichen lässt, indem man zuerst eine Hautstelle, etwa einen Finger, durch Eintauchen in kaltes Quecksilber erheblich abkühlt; man hat dann eine lang anhaltende Kälte-Empfindung; taucht man aber denselben abgekühlten Finger sogleich in warmes Quecksilber, dessen Temperatur durch Probiren leicht gefunden wird, dann verschwindet augenblicklich die Kälteempfindung, es tritt *keine* Wärme-Empfindung ein und es fühlt sich der Finger mit der anderen normal temperirten Hand *kalt* an. Hier ist die Wirkung der Kälte-Erregung durch eine gleichzeitige Wärme-Erregung aufgehoben. Fällt letztere fort, dann ist die erstere wieder da. Die eine complementäre Farbe erscheint sofort wieder an Stelle des farblosen Lichts, wenn die andere beseitigt wird, welche mit ihr zusammen Weiss gab.

§ 31. Temperaturempfindungen sind an Berührungsempfindungen gebunden, Farben an Helligkeitsempfindungen.

In wiefern kann man nun den Effect der Neutralisation complementärer Farben mit dem der Neutralisation complementärer Temperaturen in der Haut parallelisiren? Wenn auch bis hierher die Uebereinstimmungen des Temperatursinns und des Farbensinns überraschend vollkommen sind, so scheint doch die neutrale Temperaturempfindung der indifferenten farblosen Lichtempfindung schon darum nicht in ähnlicher Weise zu entsprechen, weil die farblose

Lichtempfindung vom tiefsten Schwarz durch Dunkelgrau, Grau Hellgrau hindurch zum blendenden Weiss hin und zurück sich bewegen kann. Doch gilt auch hier für die Haut Analoges.

Denn erstens hat man, wenn die Abkühlung einer Hautstelle genau so gross ist, wie ihre Erwärmung, zwar keine Temperaturempfindung, wohl aber empfindet man die Haut, ihre Spannung, wahrscheinlich auch die Blutbewegung (bei höchst gespannter Aufmerksamkeit); jedenfalls unterscheidet sich dieser neutrale Zustand des thermothetischen Apparats von jeder Temperaturempfindung geradeso sicher, wie Farblosigkeit von Farbe.

Zweitens steht fest, dass man keine Temperaturempfindung haben kann, ohne eine Veränderung der betroffenen Hautstelle zu merken. Nur dadurch, dass sie berührt wird, sei es durch ein Gas, sei es durch einen tropfbarflüssigen oder festen Körper, kann überhaupt ihre Temperatur sich ändern. Auch die atmosphärische Luft berührt die Haut. Temperaturempfindungen ohne alle Berührung sind unmöglich. Ebenso sind unmöglich Farben ohne Helligkeit. Aber Helligkeitsempfindungen ohne Farbe sind ebenso leicht zu erzielen wie Berührungen ohne Temperaturreize. Hat der berührende Körper gerade die Temperatur der berührten Hautstelle, dann tritt keine Temperaturempfindung ein. Im finsteren Raume ändert sich die Netzhautempfindung nicht, wenn man das Auge öffnet oder schliesst.

Drittens kann die Temperatur jedes berührten kalten oder warmen Objects leicht so zu- oder abnehmen, dass wir nicht mehr wissen, ob es warm oder kalt ist, weil seine Temperatur sich zu wenig von der Hauttemperatur unterscheidet. So kann auch jede kalte oder warme Farbe leicht so lichtschwach werden, dass wir sie nur noch als dunkelgrau empfinden, d. h. ihre Helligkeit ist dann nur noch eben grösser, als die des Augenschwarz ohne die geringste Farbenempfindung. Nimmt dagegen die Intensität der Berührung zu, dann wird ein Punct erreicht, bei dem eine vorher deutliche Temperaturempfindung undeutlich wird oder verschwindet. Wenn man z. B. die gehobene Haut des Handrückens mit einer breitschenkeligen Pincette immer stärker bis zum Eintritt des Schmerzes comprimirt, dann weiss man nicht mehr, ob die Pincette warm oder kalt ist; nach dem Entfernen derselben wird die Temperatur deutlich. Hier liefert das Undeutlichwerden sämmtlicher Farben, wenn sie an Lichtstärke zunehmen, das Correlat, indem

dann die Helligkeitsempfindung so zunimmt, bis zum schmerzhaften blendenden Weiss, dass keine Farbe mehr erkannt werden kann. Durch Verminderung der Lichtmenge werden sie wieder deutlich.

Endlich ist es leicht, sich davon zu überzeugen, dass eine Temperatur als warm oder kalt nicht erkannt, sondern nur die Berührung gemerkt wird, wenn die Zahl der erregten Hautnervenenden sehr klein, d. h. die berührte Hautstelle sehr klein ist. Ebenso kann man eine Farbe nicht erkennen, wenn ihre Fläche eine zu geringe Anzahl von Netzhautelementen bedeckt, sie erscheint dann farblos. Umgekehrt wird eine Wärme- oder Kälte-Empfindung immer deutlicher, je grösser die berührte Hautfläche ist und eine Farbe wird gleichfalls um so deutlicher als solche erkannt, je grösser das Netzhautbild ihrer Fläche ausfällt.

Diese thatsächlichen Uebereinstimmungen des Berührungs- und Licht-Sinnes lassen es durchaus natürlich erscheinen, die Berührungsempfindungen, deren Intensität innerhalb sehr weiter Grenzen schwankt, und an welche die Temperaturempfindungen gebunden sind, den Helligkeitsempfindungen (Schwarz, Grau, Weiss), deren Intensität ebenso variirt, und an welche die Farbenempfindungen gebunden sind, an die Seite zu stellen. Jede Erregung der Netzhaut, sei sie wie immer beschaffen, gibt zunächst eine Licht- oder Helligkeitsempfindung, jede Erregung der Hautnervenenden eine Berührungs- oder Spannungs-Empfindung.

§ 32. Die Neutralpuncte der Haut und Netzhaut.

Es fragt sich aber, welcher Intensitätsgrad der Helligkeit dem Neutralpunct entspricht. Wenn die stärkste Berührungsempfindung (mit schmerzhaftem Druck) dem blendenden Weiss correspondirt, dann könnte man das tiefste Schwarz, welches nach Entfernung des Lichtreizes eintritt, der Empfindung des Zuges von der Haut fort nach Aufhebung jeder Berührung vergleichen. Diese kann aber nicht vorkommen. Der gewöhnliche Zustand der Haut ist der permanenter Berührung und Eigenerregung, entsprechend dem Grau im geschlossenen Auge, welches durch die poliogene Eigenerregung der Retina zu Stande kommt. Ebenso wie nun diese Helligkeits-Empfindung ohne jede Farbigkeit nach Reizungen an Intensität zu- und abnimmt, nimmt die neutrale Hautempfindung ohne jede Temperaturveränderung an Intensität bei Berührungen

ab und zu. Mit den Aenderungen der Intensität (Licht) und jenen der Qualität (Farbe) ist die Leistung des optischen Empfindungsapparates erschöpft; geradeso lässt der Hautnerv nur Intensität (Berührung) und Qualität (Temperatur) unterscheiden im Gebiete der reinen Empfindung, ohne räumliche und zeitliche und causale Momente und den Muskelsinn u. s. w. hinzuzunehmen.

Beim gewöhnlichen Ruhezustande beider Organe, wenn also keine äusseren Reize auf die Netzhaut und Haut wirken, kann man nun den Neutralpunct der Intensitäts-Scala mit dem der Qualitäts-Scala zusammenfallen lassen, weil wirklich die neutrale Farblosigkeit beim gleichzeitigen Einwirken kaltfarbiger und warmfarbiger Strahlen mittlerer Lichtstärke mittleres Grau gibt, und Hautwärme zusammen mit Hautkälte der neutralen Temperaturempfindung und zugleich der gewöhnlichen Hautspannung in der Luft entspricht.

§ 33. Die Ungleichheit der Neutralpuncte verschiedener Hautstellen und ihre Verschiebungen.

Es ist aber vom grössten Interesse für die Theorie der sinnlichen Wahrnehmungen, dass in der Haut wie in der Netzhaut eine Verschiebung des Neutralpunctes leicht eintreten kann und nicht alle Stellen zugleich denselben Neutralpunct haben. Die Zunge hat ihren Neutralpunct viel höher, als die Handhaut, diese tiefer als die Stirnhaut.

Folglich muss, was an der einen Stelle kühl erscheint, an der anderen kalt, wieder an einer anderen warm erscheinen, da man eine Temperaturempfindung immer nach ihrem Abstande vom Neutralpunct beurtheilt. Ich habe darüber zahlreiche Versuche angestellt, welche unter sich gut übereinstimmen. Sie datiren zum Theil aus dem Jahre 1876. Ich bestimmte damals u. a. für mich und andere den Neutralpunct für die einzelnen Finger, wurde aber durch das Erscheinen der trefflichen „Grundzüge einer Theorie des Temperatursinnes“ von Hering (1877) bewogen, die ganze Untersuchung abzubrechen, da ich denselben damals etwas wesentlich Neues nicht hinzuzufügen hatte. Neuerdings habe ich die früheren Befunde bestätigt, und finde unter Beobachtung aller erdenklichen Cautelen bei Vergleichung der Temperaturempfindungen, welche zwei sehr ungleiche, aber annähernd constant temperirte Theile,

nämlich die Zunge und der weder kühle noch warme Finger, beim Eintauchen in Quecksilber und Wasser geben, u. a. folgende hierhergehörige Thatsachen.

Die Zungenspitze in Quecksilber von —12° C. getaucht, gibt gar keine Temperaturempfindung. Die ihr anhaftende Mundflüssigkeit gefriert fast augenblicklich zu festem Eis. Ein „brennendes" schmerzhaftes Gefühl tritt auf von genau derselben Beschaffenheit wie dasjenige „Brennen", welches auftritt, wenn ich das untere Ende eines 90 bis 100° C. zeigenden Thermometers auf die Zungenspitze lege. Auch hierbei habe ich nicht die geringste Temperaturempfindung mehr. Die lange anhaltende Nachwirkung ist nach der Abkühlung und Erwärmung identisch im Gefühl. Hier berühren sich also extreme Reizungen. Die Temperaturempfindung steht im zweiten Neutralpunct, welcher aber im gewöhnlichen Leben nur selten erreicht wird. Vergleicht man hiermit die Wirkung des auf —12° abgekühlten Quecksilbers auf den Finger, so zeigt sich ein grosser Unterschied. Der normal temperirte Finger gibt eine sehr deutliche Kälteempfindung beim Eintauchen, welche selbst nach längerem (bis 30 Sec. langem) Berühren als solche an der Grenze, trotz des Schmerzes, kenntlich bleibt. Ebenso fühlt sich das 90 bis 100° warme Thermometer heiss an. Durch den heftigen Schmerz wird aber die Hitze-Empfindung undeutlich.

Die Zunge gibt auch bei —11° noch keine deutliche Kälte-Empfindung. Ihre Oberfläche bedeckt sich dabei schnell mit hartem Eis und der brennende Schmerz hält lange an. Der in solches Quecksilber eingetauchte Finger gibt dagegen sofort eine entschiedene Kälte-Empfindung und erst nach längerer Berührung Schmerz.

Bei — 10° ist für die Zungenspitze die Kälte-Empfindung immer noch nicht recht deutlich, für den Finger sehr deutlich.

Bei — 8° Zunge mehr schmerzhaft als kalt, Finger sehr kalt.

Bei — 6° Zungenspitze viel kälter, als Finger empfunden.

Bei — 3° dasselbe.

Ein und dasselbe Eisstück erscheint, wenn es die Zunge oder die Stirn berührt, viel kälter, als wenn es die Hand berührt. Auch Quecksilber wird, wenn es gerade 0° hat, viel kälter empfunden, wenn man die Zungenspitze eintaucht, als wenn man den Finger eintaucht. Dasselbe gilt für Wasser von + 4°.

Merkwürdigerweise ist es weiterhin viel schwieriger ein Ur-

theil abzugeben, ob Zunge oder Finger die grössere Kälte-Empfindung geben. Für alle Finger ist aber 31° entschieden laukühl, 34° lauwarm, 35° warm, für die Zunge laukühl, 37,5° für die Zunge indifferent, für die Finger warm, 39° für die Zunge lauwarm, für die Finger wärmer, 48° für die Zunge warm, für die Finger heiss, 53° recht warm für die Zunge, sehr heiss für die Finger, doch innerhalb der ersten Secunden nicht schmerzhaft. Bei 60 bis 69° beginnt für die Finger der Schmerz sehr bald nach dem Eintauchen, für die Zunge noch nicht. Bei 86° ist auch für diese der Schmerzpunct erreicht.

In Wasser von 60° kann ich höchstens 8 Secunden lang den Finger eingetaucht halten, dann tritt schon heftige Schmerzempfindung auf. Eben dieses Wasser kann ich aber ohne Zögern und Unlust im Munde dulden, ohne Zweifel, weil die Ausgleichung hierbei viel schneller vor sich geht. In Wasser oder Quecksilber von 78° kann ich nur 2 bis 6 Sec. einen Finger, ohne heftigen Schmerz zu fühlen, eingetaucht halten. Berühre ich Quecksilber von 86 bis 88°, so tritt der Schmerz nach 1 bis 2 Secunden ein.

Hat man jedoch vorher durch oft wiederholtes Eintauchen eines Fingers in 50° warmes Wasser, dessen Eigenwärme erhöht und dadurch den Neutralpunct nach der Wärme zu verschoben, dann empfindet man mit diesem Finger sogar 37° warmes Wasser kühl, welches dem Nachbarfinger warm erscheint; aber mit jenem künstlich erwärmten Finger empfindet man — 7° kaltes Quecksilber lange nicht so kalt, wie mit dem Nachbarfinger. Umgekehrt findet man unmittelbar nach Abkühlung eines Fingers durch Eintauchen in Quecksilber von — 5° bis — 8° das vorher sehr heisse Wasser nur lauwarm (weil der Finger sich langsam erwärmt). Also hängt es von der Lage des Neutralpuncts ab, ob man eine gegebene Temperatur der Haut warm oder kühl empfindet, indem der Abstand von demselben maassgebend ist für den Grad der Temperaturempfindung. Wenn für die normale Hand z. B. 32° dem Neutralpunct entspricht, für den Mund 37°, für die abgekühlte Hand etwa 27° oder noch weniger, so erscheint für die letztere sehr kaltes noch kälter, lauwarmes wärmer, als für die normale Hand, für den Mund aber sehr kaltes weniger kalt (schmerzhaft), warmes weniger warm, lauwarmes kühl, wegen des veränderten Abstandes der Hauttemperatur vom Neutralpunct, wie die Figur VI zeigt.

Die positiven Ordinaten bezeichnen die Deutlichkeit der

Wärme-Empfindung, die negativen die der Kälte-E
auf die objective Temperatur der Haut unter gl
Die Einheiten sind willkürlich gewählt (Fig. V

§ 34. Die Verschiebung des Neutralpunc temperatur macht die Farbenblindhei Rothgrünsichtigkeit und Gelbblausic ständlicher.

Wendet man diese Erfahrungen auf den Fa
gibt sich ein vollkommener Parallelismus zwisch
tischen und Wärme-Empfindungen einerseits un
tischen und Kälte-Empfindungen andererseits.
erwägt, dass der Neutralpunct der Farbentemper
im Spectrum an der hellsten Stelle zwischen G
grün, und für die eine Classe von typisch Farbe
Gelb, für die andere im reinen Grün liegt, so
bei den typisch Rothgrünblinden, welche man
sichtig nennt, der Neutralpunct nach der k
schoben ist, während er nach der warmen S
bei den Gelbblaublinden, d. h. bei den Ro
(Fig. VII).

Für das normale Auge ist warm, was bla
gelb und grüngelb, kalt was gelbgrün, grün, b
lett erscheint. Verschiebt sich der Indifferenzp
grünsichtigen) nach der warmen Seite, dann we
für Grüngelb negativ, Grüngelb wird grün, d. h.
Die Ordinate für Gelb wird Null. Gelb wird
kalt empfunden, d. h. nur noch als farbloses L
Rothgelb erscheinen weniger warm, d. h., da G
Roth, und Roth erscheint als die wärmste Farbe

hin zunächst Grüngelb wärmer, d. h. Gelb; Gelb selbs
wie für das normale Auge, oder noch wärmer,
weniger warm, nämlich gelb, weil Roth fehlt, und Gel
selben Grunde weniger warm: dunkelgelb. Dem Ro
erscheinen die weniger kalten Farben noch weniger
teren noch kälter. Wegen der Verschiebung des
nach der kalten Seite ist das Gelbgrün in seiner Nä
nämlich rein gelb, das Grün wird gar nicht mehr k
nicht warm empfunden. Seine Ordinate ist Null;
wird weniger kalt, nämlich blau, ebenso das Grünb
des Normalen erscheint hingegen noch reiner als di
vom Grün und Roth ganz befreit ist; das Violett wi
ihm das Roth fehlt. Es wird blau (Fig. VII).

Die Curven verdeutlichen das Gesagte. Die
chrome, hier schwarz wiedergegebene) entspricht
Auge. Die äussersten Spectrumenden sind bei ein
blinden nicht nur unverkürzt, sondern auch über di
noch hell, was die Figur gleichfalls zur Anschauun

Alle durch die neuesten Untersuchungen monoc
blindheit sichergestellten Thatsachen gewinnen nac
Darstellung einen Zusammenhang, welchen sie vorhe
Die typische Farbenblindheit beruht dana
dauernden Verschiebung des Indifferenzpu
Farbentemperatur und entspricht derjenigen Unv
des Temperatursinns, welche eintritt, wenn eine grös
dauernd abgekühlt oder erwärmt gehalten wird. De
der Wärme- und Kälte-Empfindungen ist dann g
schoben.

Es ist wahrscheinlich, dass die physiologische
heit der peripheren Netzhautregion ebenfalls auf eine
Verschiedenheit in der Lage des Indifferenzpunctes
beruht. Er muss mehr nach der kalten Seite zu

§ 35. Der totalen Farbenblindheit entspricht der Mangel des Temperatursinnes mit erhaltenem Berührungssinn.

Der totalen Farbenblindheit, welche bei vielen Dämmerungs- und Nacht-Thieren physiologisch ist, entspricht derjenige nicht selten beobachtete pathologische Zustand, bei dem zwar noch Berührungen, aber keine Temperaturen mehr empfunden werden. Hier hat jeder chromatogene Reiz nur Helligkeitsempfindung zur Folge, welche von der Amplitude der einwirkenden Aetherschwingungen abhängt. Für Unterschiede der Oscillationsweite bei beliebiger Schwingungsdauer ist ein solches Auge noch sehr empfindlich, für Unterschiede der Schwingungsdauer, d. h. Farben, unempfindlich. Es gleicht der Haut, welche für Berührungen empfindlich, für die den verschiedenen Wärmegraden entsprechenden Unterschiede der Schwingungsgeschwindigkeit nicht mehr empfindlich ist. Dieser Zustand lässt sich künstlich herbeiführen durch enorme Steigerung und Herabsetzung der Hauttemperatur und durch Nervencompression. Man empfindet dann kaum noch Wärme und Kälte, hat aber Berührungsempfindungen, ein Prickeln, dann ein schmerzhaftes Stechen bei jeder Berührung. Dass jede Reizung des total farbenblinden Auges eine Lichtempfindung gibt, lässt eine grosse Erregbarkeit seiner Retina vermuthen. In der That war im Magnus'schen Fall Photophobie vorhanden.

Ich habe nun sowohl einige der wichtigsten, dem Farbensinn zu Grunde liegenden Thatsachen, als auch die Uebereinstimmung derselben mit Thatsachen des Temperatursinnes genügend dargethan, um meine Hypothese über die Vorgänge im nervösen Theile des Sehorgans zu skizziren. Dass dieselbe von der Identität der Wärme- und Licht-Bewegung, als dem objectiven Reize, ausgeht, bedarf heutzutage keiner Begründung mehr. Die photogenen Schwingungen haben Wellenlängen von weniger als 900 Milliontel-Millimeter, die thermothetischen von erheblich mehr; und wenn auch die dunkeln Wärmestrahlen erst bis zur Wellenlänge von 7000 Milliontel Millimeter (= $^1/_{143}$ Millimeter) gemessen worden sind, so ist doch gewiss die Wellenlänge der Kälte-Schwingungen, welche die Hautnerven stark erregen, erheblich grösser.

VI. Die Hypothese.

§. 36. Die periphere Theilung der Sehnervenfasern.

Jede physiologische Hypothese muss in erster Linie mit anatomischen Thatsachen im Einklang stehen. Die Dreifarbenlehre verstösst gegen dieses Princip, da sie annimmt, dass in jedes chromatogene und photogene Netzhautelement drei specifisch verschiedene Sehnervenfasern gehen; denn die Anzahl der Fasern des Sehnerven unmittelbar vor dem Eintritt in den Augapfel des Menschen ist, wie Kuhnt fand, viel kleiner, als die Anzahl der Stäbchen und Zapfen der Netzhaut; folglich müssen sich die Sehnervenfasern peripher theilen, und zwar müssen, da es nach den Untersuchungen von Max Schultze nicht bezweifelt werden kann, dass von den äussersten Enden der Opticusfasern die Zapfen sowohl die Licht- wie die Farben-Perception, die Stäbchen dagegen nur die Lichtperception vermitteln, mindestens zwei photogene und zugleich chromatogene Elemente, d. h. Zapfen, auf jede in der stäbchenfreien Netzhautgrube endigende Sehnervenfaser kommen. Die Ganglienzellen der Retina, in welche die Opticusfasern eintreten, bieten für die Vereinigung zweier Endfasern zu einer Opticusfaser den natürlichsten Ort, da jene Ganglienzellen stets multipolar sind.

Im Gehirn endigt jede Opticusfaser in eine Ganglienzelle und diese steht mit anderen Ganglienzellen in organischer Verbindung. Es ist statthaft, anzunehmen, dass jede centrale Opticusfaser vermittelst der ersten Ganglienzelle, in die sie endigt, mit zwei anderen höherer Ordnung verbunden ist (Fig. VIII).

§ 37. Die chromatogenen Zapfenpaare.

Ich nehme ferner an, dass von den beiden Zapfen, welche das Ende einer Opticusfaser sind, der eine nur durch warmfarbige Lichtstrahlen erregt wird, der andere nur durch kaltfarbige, so dass die beide Erregungen aufnehmende Ganglienzelle der Netzhaut entweder nur erstere oder nur letztere oder beide, sei es in sehr rascher Abwechslung, sei es algebraisch summirt, durch die Sehnervenfaser in das Sensorium befördert. Die erste centrale Ganglienzelle ermöglicht dann den ankommenden ungleich frequenten Erregungen je nur einen Weg weiter, indem die warmfarbige Er-

regung nur in die eine, die kaltfarbige nur in die andere höher gelegene Ganglienzelle gelangt, wo sie Farbe wird. Die erste centrale Ganglienzelle hat demnach die Function, die beiden Erregungen zu sondern.

Im rothgrünsichtigen Auge sind die sämmtlichen anachromatischen (warmfarbigen) Zapfen ausschliesslich erythrogen, die sämmtlichen katachromatischen (kaltfarbigen) ausschliesslich chlorogen, da sein zweifarbiges Spectrum nur aus Roth und Grün besteht (Blaugelbblindheit).

Im gelbblausichtigen Auge sind die sämmtlichen anachromatischen Zapfen ausschliesslich xanthogen, die sämmtlichen katachromatischen ausschliesslich glaukogen, da ihr zweifarbiges Spectrum nur aus Gelb und Blau besteht (Rothgrünblindheit).

Im normalen Auge sind dagegen beide Zapfen-Paare gleichmässig vertreten (Fig. VIII), ausser an der Peripherie der Netzhaut, wo die Rothgrün-Zapfen fehlen. Im normalen Auge sind ferner die Zapfen so angeordnet, dass — wie in der Vogelretina die ungleich pigmentirten Zapfen — erythrogene und xanthogene Elemente in ziemlich gleichmässigen Abständen von einander und von den chlorogenen und glaukogenen Zapfen vertheilt sind, so dass auch beim kleinsten Netzhautbild jedenfalls alle chromatogenen Erregungen vorkommen können. Mögen nun, wie Charpentier (*Comptes rendus 1880*) meint, etwa 2000 Zapfen zur Erkennung jeder Farbe erregt werden müssen oder etwas weniger, gewiss ist, dass sehr viele Zapfen, welche auf eine Farbe abgestimmt sind, zugleich erregt werden müssen, um die betreffende farbige Empfindung zu geben, wie in der Haut viele Nervenenden afficirt sein müssen, um die Temperaturen erkennen zu lassen.

Die Wellenlängen der den beiden Zapfenpaaren entsprechenden Lichtarten ergeben sich aus meinen Bestimmungen der Orte der Urfarben im Spectrum. Dieselben scheinen in einem einfachen Zahlen-Verhältniss zu einander zu stehen. Für reinstes Grün ergab sich $\lambda_{gr} = 512{,}4$. Wenn nun λ für Grün : Roth wie 3 : 4 und für Blau : Gelb wie 4 : 5 sich verhält, wie es sich schon bei meinen früheren Beobachtungen als wahrscheinlich herausstellte (1870), dann sind die Wellenlängen der vier Grundfarben approximativ (s. oben § 25):

				Verhältniss:
Roth	683,20 (λ_{ro}):	Grün	512,40 (λ_{gr})	4 : 3
Gelb	576,45 (λ_{ge}):	Blau	461,16 (λ_{bl})	5 : 4

oder die Wellenlänge des Roth ist um 1/3 grösser, als die des Grün, die Wellenlänge des Gelb um 1/4 grösser, als die des Blau, ausserdem die des Roth um 2/3 grösser, als die des Violett ($\lambda_{vi} = 410$).

Die Roth-Zapfen geben nun bei Erregung durch langwelliges Licht vom Ultraroth bis λ_{ge} und kurzwelliges von $\lambda = 415$ bis 405 eine und dieselbe Empfindung und zwar nur reines Roth (wie typisch Blaublinde sie haben) und wie ich im negativen Nachbild des reinsten (gelbfreien und blaufreien) isolirten spectralen Grün bei Ausschluss alles andern Lichts wahrnahm. Die Grünzapfen geben nur die Empfindung des reinen Grün und werden erregt nur durch mittelwellige und kurzwellige Strahlen von λ_{ge} bis zum Urblau λ_{bl}.

Die Gelb-Zapfen werden nur erregt durch langwellige Strahlen vom äussersten Roth an bis zu λ_{gr} und zwar am stärksten bei λ_{ge}. Die Empfindung ist aber immer Gelb ohne farbige Nuancen. Und diese Empfindung wird darum beim gewöhnlichen Sehen besonders hell sein müssen, weil durch das gelbe Pigment an der Stelle des deutlichsten Sehens von allen Lichtstrahlen die xanthogenen am wenigsten geschwächt werden müssen.

Die Blau-Zapfen werden nur erregt durch kurzwellige Strahlen vom reinsten Grün λ_{gr} an bis zum Ueberviolett, am stärksten bei λ_{bl}.

§ 38. Die Zusammengesetztheit der Licht- und Farben-Empfindungen.

Die sämmtlichen wirklich vorkommenden Farbenempfindungen normaler und farbenblinder Augen werden nun zu Stande gebracht durch gleichzeitige Erregung der zwei Zapfenpaare, so dass man z. B. hat, wenn „erythrogen" die Roth-Zapfen, „xanthogen" die Gelb-Zapfen, „chlorogen" die Grün-Zapfen, „glaukogen" die Blau-Zapfen bedeutet, von denen also die ersten und dritten einerseits, die zweiten und vierten andererseits in je eine Ganglienzelle und eine Opticusfaser münden, und wenn „+" erregt, „—" unerregt bezeichnet:

λ		erythrogen	xanthogen	chlorogen	glaukogen.
686—678	Roth	+ + +	+	—	—
	Gelbroth	+ +	+	—	—
	Rothgelb	+	+ +	—	—
578—572	Gelb	—	+ + +	—	—
	Grüngelb	—	+ +	+	—
	Gelbgrün	—	+	+ +	—
516—510	Grün	—	—	+ + +	—
	Blaugrün	—	—	+ +	+
	Grünblau	—	—	+	+ +
468—458	Blau	—	—	—	+ + +
	Rothblau	+	—	—	+ +

Die Farbencurven (Fig. III) stellen diese Beziehungen dar, indem die positiven Ordinaten dem +, die negativen dem — entsprechen. Letztere sind wie erstere abzustufen.

Hierbei bedeutet das + die Intensität der Erregung (wie beim Mitschwingen im Ohre) bei völlig gleicher Amplitude der erregenden objectiven Schwingungen.

Aendert sich die letztere, dann wird die Farbe heller oder dunkeler. Es ist allgemein anerkannt, dass die Farbenqualität von der Schwingungsdauer, die Helligkeit von der Amplitude und zugleich der Schwingungsdauer abhängt. Wächst die Erregung — bei irgend einer Farbe — so wird diese heller, weisslich, schliesslich weiss; nimmt sie ab, dann wird die Farbe dunkel, schliesslich schwarz. Dem entsprechend ist die Erregung des chromatogenen Apparats im ersteren Fall gross, im zweiten klein. Wenn die Roth- und die Grün-Zapfen zugleich gleichstark erregt werden, dann werden die durch beiderlei Aetherschwingungen hervorgerufenen Nervenschwingungen bis zur peripheren Ganglienzelle gesondert fortgepflanzt, hierauf aber, da ein und dieselbe Nervenfaser nicht zu gleicher Zeit in zweierlei Weise erregt sein kann, wechseln die beiden Schwingungsfrequenzen in der Nervensubstanz so rasch mit einander ab (falls nicht algebraische Summirung eintritt), dass keine von beiden für sich allein im Centralorgan zur Wirkung kommen kann. Kommt aber keine von beiden zur Wirkung, dann wird auch keine Farbe empfunden, also ist, da die Schwingungen der Nervensubstanz, wenn sie stark genug sind, irgend eine Wirkung haben müssen, Steigerung der Eigenerregung der Netzhaut,

d. h. eine farblose Empfindung die Folge. Grau oder Weiss wird empfunden, wenn complementäre Strahlenpaare einwirken (§ 30). Hiernach ist die Empfindung Weiss in der That zusammengesetzt, und zwar in manigfaltiger Weise, aus einem complementären Farbenpaar, aus zwei, drei oder mehreren oder allen complementären Farbenpaaren. Die ganze eine Hälfte des Spectrum vom Roth bis zum Grüngelb ist der anderen vom Gelbgrün bis zum Violett complementär. Und diese Zusammensetzung des Weiss, gegen welche man immer noch einwendet, das Weiss sei doch eine einfache Empfindung, in welcher man die angeblichen Componenten nicht empfindbar machen könne, lässt sich demonstriren mittelst intermittirender Beleuchtung. Denn wenn man aus complementären Farben mittelst des Farbenkreisels Hellgrau herstellt, dann erkennt man auch bei der grössten Rotationsgeschwindigkeit sofort die Componenten, wenn man nur zwischen Auge und Kreiselscheibe eine rotirende gefensterte Scheibe anbringt oder sonst in geigneter Weise Zitterlicht herstellt. Dann gelingt es leicht, für jedes Weiss oder Grau, welches einen völlig homogenen Eindruck macht und dessen Herstellung man nicht kennt, sofort die Componenten anzugeben. Auch sieht man die Bestandtheile der Mischfarben Orange, Violett, Grüngelb, Blaugrün nach diesem Verfahren sehr deutlich getrennt, ohne die Sectoren scharf abgegrenzt zu sehen, und oft in einem Wettstreit.

Nicht weniger beweisend für die Vertheilung der Farben auf räumlich getrennte Elemente in der Netzhaut, insbesondere im gelben Fleck, sind die werthvollen Beobachtungen von S. Exner (Pflügers Archiv 1868. I. 375). Ich kann einen Theil davon vollkommen bestätigen. Namentlich zerfällt für mich im Zitterlicht Violett in Roth und Blau; Roth, Grün und Blau werden nicht zerlegt, aber auch Gelb nicht, und wenn Exner Gelb in Roth und Grün zerfallen sah, so vermuthe ich hier einen Irrthum. Grünliches Gelb, das man kaum bei gewöhnlichem Sehen für grünlich erklären würde, zeigt mir im Zitterlicht deutliches Grün, orangefarbiges Gelb deutliches Roth neben Gelb, aber ich bezweifle, ob reines Gelb zugleich in Roth und Grün zerfallen kann. Vielleicht schien es so bei Anwendung von grünlichem Gelb, indem neben dem Grün die Contrastfarbe Roth entstand. Auch sah Exner selbst, wenn er das grüne Nachbild von Roth auf Roth projicirte, kein Gelb, sondern ungesättigtes Roth, und wenn er das rothe

Nachbild von Grün auf Grün projicirte, ungesättigtes Grün, also kein Gelb. Noch sei bemerkt, dass mir eine sehr helle weisse Wolke im Zitterlicht leicht abwechselnd grünlichgelblich und röthlichbläulich erscheint. Da aber nicht allein im total farbenblinden Auge alle Netzhautelemente nur melanogen, poliogen und leukogen sind, sondern auch im normalen Auge die ausschliesslich photogenen, nicht chromatogenen Stäbchen reichlich vorkommen, so ist nicht jedes Weiss und Grau zusammengesetzt. Vielmehr werden die Stäbchen auf Strahlen jeder Wellenlänge gleichmässig und nur auf ungleiche Amplituden derselben ungleich stark reagiren, wie es in den zapfenfreien Netzhäuten vieler Dämmerungs- und Nacht-Thiere der Fall ist. Das Grau und Weiss der Stäbchen kann nicht zerlegt werden. Sie sind nur photogene Apparate. Und zwar kommt ihnen vielleicht eine grössere Empfindlichkeit für Helligkeitsunterschiede zu, als den Zapfen. Viele Beobachtungen sprechen auch für eine ungleiche (und variable) Empfindlichkeit des chromatogenen Apparates der Netzhaut, d. h. der für Roth und Grün einerseits, für Gelb und Blau andererseits adaptirten und regelmässig vertheilten Zapfen, welche im Vogelauge diese Vertheilung deutlich zeigen.

§ 39. Die Functionen der peripheren und centralen photogenen Ganglienzellen.

Wenn ich aber eine zweipaarige Sonderung der Zapfen annehme, so ist damit natürlich nur gesagt, dass sie die nach hunderten von Billionen Schwingungen in der Secunde zählenden Aetherschwingungen in einem bestimmten Verhältniss vermindert auf die Opticusfasern übertragen. Und diese Function der Verminderung der Schwingungsfrequenz (Vergrösserung der Wellenlängen) fällt den übrigen Bestandtheilen der Retina zu. Dieselbe muss ähnlich wie die fluorescirende Chininlösung auf Ultraviolett wirkt, auf alle percipirbaren Lichtarten wirken. Dass dabei die Verhältnisse der Wellenlängen nahezu unverändert bleiben, während die absoluten Werthe der Schwingungsdauer und Amplitude, der Trägheit des Nerven entsprechend, andere werden, ist nothwendig.

Dass ferner ein und dieselbe Opticusfaser wie die thermothetische Faser ebensowohl Schwingungen von grosser wie von kleiner Frequenz in das Centralorgan gelangen lässt, findet sein Analogon

im motorischen Nerven, dessen Muskel, nach der Entdeckung von Helmholtz, einen Ton zeigt von derselben Schwingungszahl wie der einwirkende Reiz. Ueberdies unterscheiden wir mit derselben Hautstelle nach Ausschluss des Gehörs sehr wohl schwingende Stimmgabeln von 14 bis über 1800 Schwingungen in der Secunde, wie ich finde. Von Seiten der allgemeinen Nervenphysiologie verlangt also die Hypothese nichts Neues ausser der regulirenden Function der intermediären Ganglienzellen. Aber diese bildet nur insofern einen wesentlichen Bestandtheil der vorgetragenen Auffassung, als sie den Uebergang der zwei ungleich frequente Erregungen leitenden Opticusfaser in zwei gesonderte — nur je einer Erregung von einer Frequenz angepasste — Fasern und höher gelegenen Ganglienzellen vermittelt. Wenn man mittelst eines combinirten Telephonpaares zwei Stimmgabeln, die um einige Schwingungen differiren, hört, dann hört man gleichzeitig beide Gabeln, da man Schwebungen hört, im Ankunftstelephon. Ein geeigneter Resonator kann aber nur auf éinen Ton ansprechen. Die peripheren Ganglienzellen gleichen den Abgangs-Telephonen, die Zapfen den Gabeln. Erstere nehmen beiderlei Erregungen von letzteren auf und befördern beide. Auch empfängt die centrale Ganglienzelle niederer Ordnung beiderlei Erregungen, wie das Ankunftstelephon, der Resonator aber nur einerlei, wie die Ganglienzelle höherer Ordnung. Der Vergleich ist sehr unvollkommen, dient aber in Ermanglung eines besseren zur Verdeutlichung. Das Schema (Fig. VIII) veranschaulicht nur den morphologischen Zusammenhang der peripheren und centralen chromatogenen Elemente und erwartet von einer vervollkommneten anatomischen Technik seine Bestätigung.

§ 40. Schlussbemerkungen.

Schliesslich wäre zur Vervollständigung dieses Erklärungsversuches der Netzhautfunctionen, soweit sie sich auf Farben und Licht beziehen, der Nachweis zu liefern, wie er mit den Thatsachen der Farbenlehre im Einzelnen übereinstimmt, und wie der Temperatursinn nach denselben Principien sich darstellen lässt. Beides würde in dieser vorläufigen Abhandlung nicht am Platze sein. Beides kann auch erst gründlich geschehen, wenn die wenigen bisher bekannten Fälle monocularer Farbenblindheit durch weitere Fälle Bestätigung erhalten. Sollte ein Fall von Gelbblaublindheit auf dem einen, Rothgrünblindheit auf dem anderen Auge zur Be-

obachtung gelangen, so würde daraus für die Farbenlehre gleichfalls eine Reihe von wichtigen Thatsachen sich ergeben.

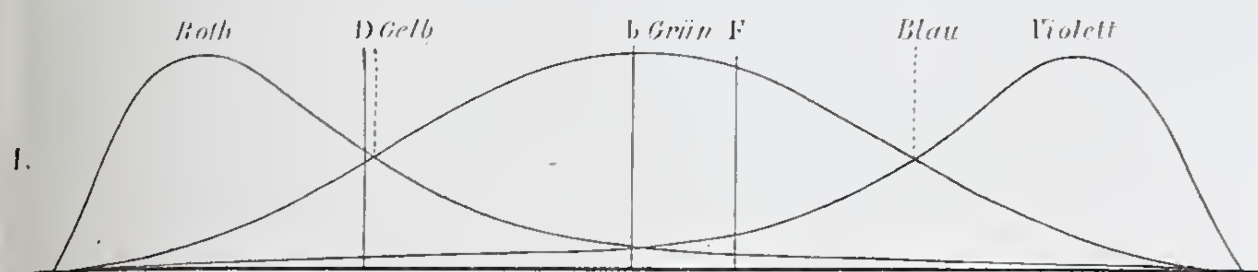
In Betreff des Temperatursinns müssen die pathologischen Fälle eingehender geprüft werden. Namentlich wäre es wichtig, zu wissen, ob local eine Unempfindlichkeit sowohl gegen sehr hohe Temperaturen wie gegen Kühle ohne gleichzeitige Unempfindlichkeit gegen mässige Wärme- und starke Kälte-Reize und das umgekehrte vorkommt, entsprechend den beiden Classen typischer Farbenblindheit.

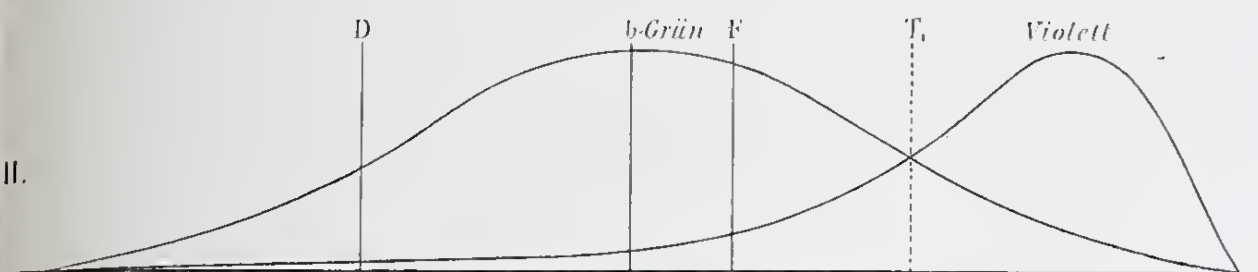
Endlich ist der vergleichend-physiologische Nachweis von der allmählichen Entwicklung des Farbensinns aus dem Temperatursinn auf Grund der vergleichenden Anatomie noch zu liefern.

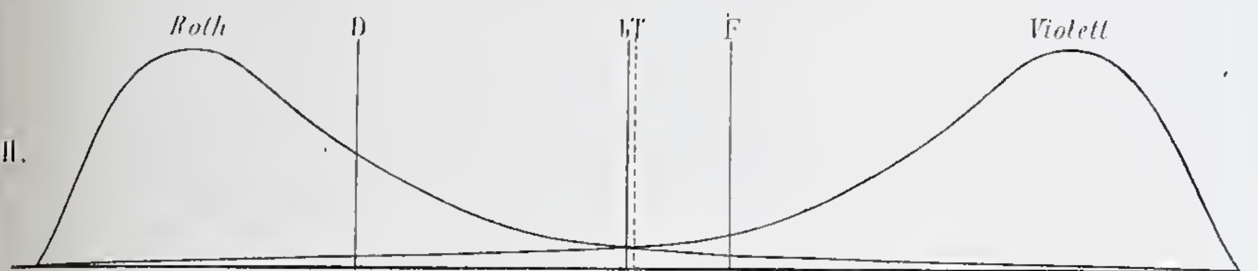
In Bezug auf diesen Punct freut es mich, worauf ich erst nach dem Druck dieser Abhandlung aufmerksam wurde, mit **Pflüger** übereinzustimmen, welcher bereits i. J. 1877 (in seinem Archive XV. S. 91—94) die phylogenetische Zusammengehörigkeit des Wärme- und Licht-Sinns hervorgehoben hat. Dass ihm zufolge die Schwärze der Kälte entsprechen soll, verträgt sich freilich mit obigen Theoremen (§ 31. 32. 35) nicht, aber auch dieser Gedanke ist auf dem Boden der Entwicklungslehre entstanden.

Universitäts-Buchdruckerei von Carl Georgi in Bonn.

Fig. I.







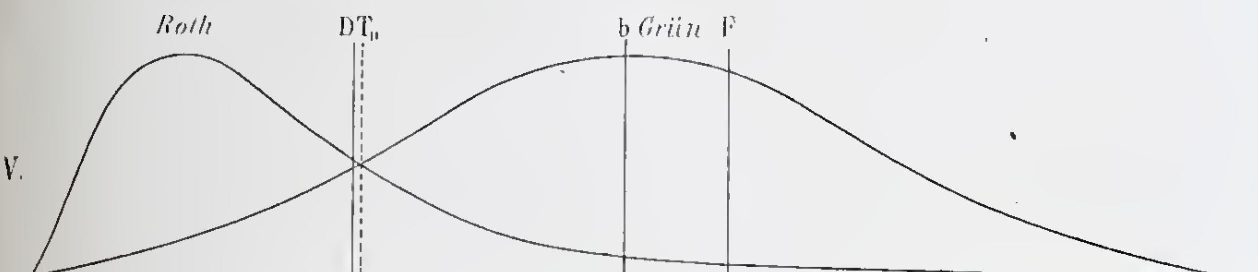


Fig. VI.

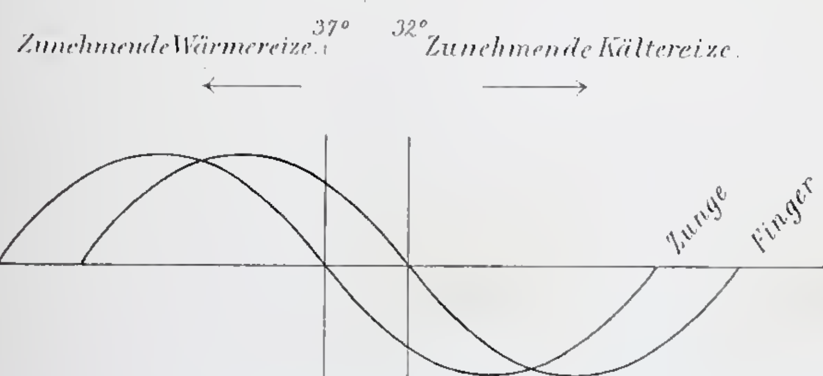


Fig. III.

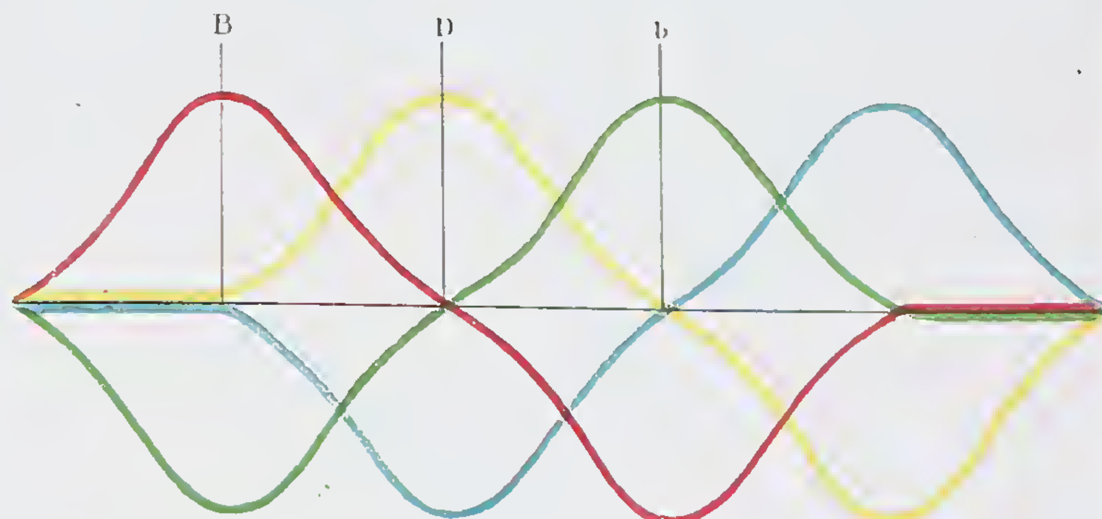


Fig. IV.

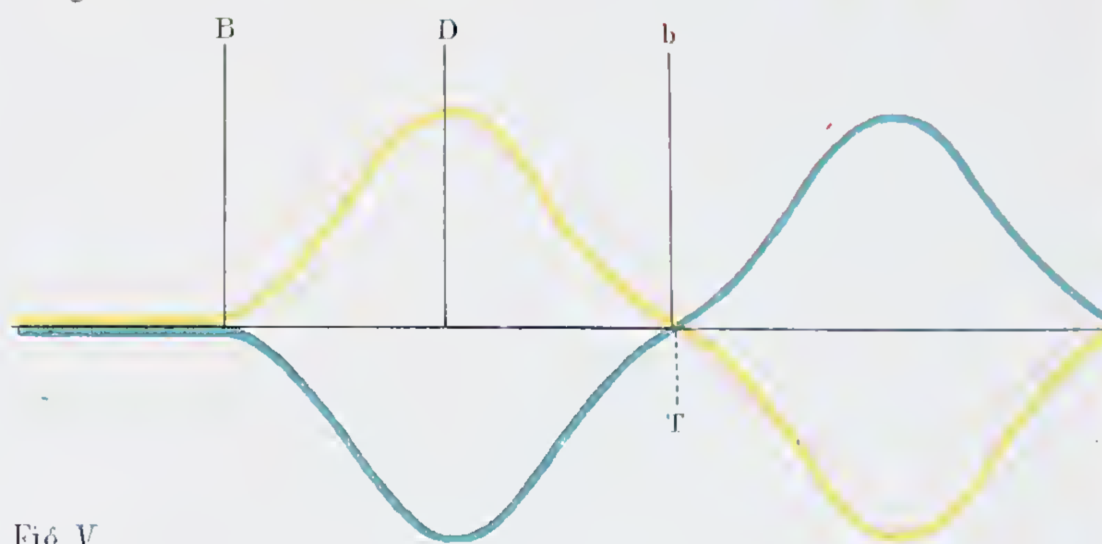


Fig. V.

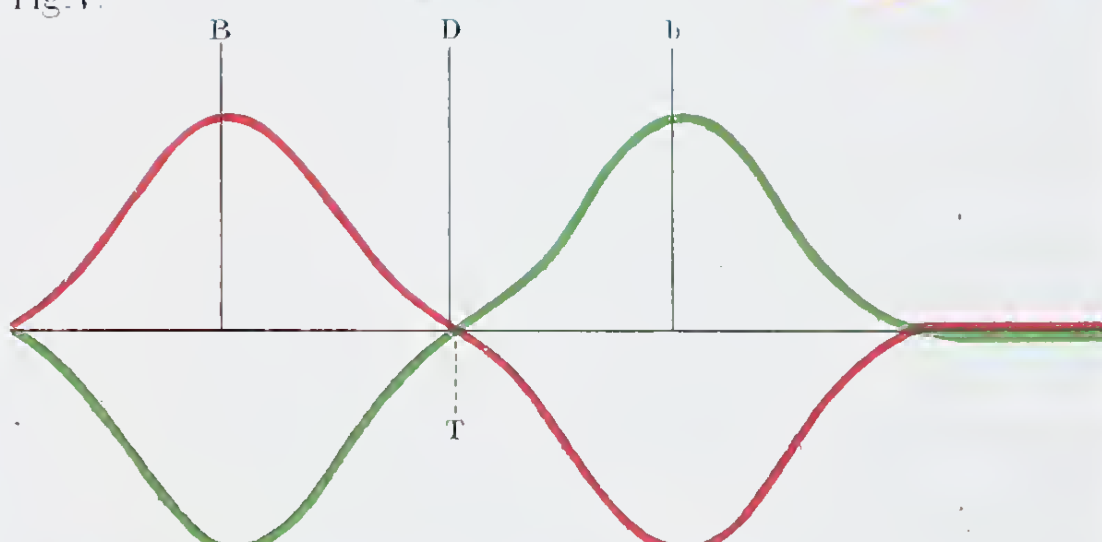


Fig. II.

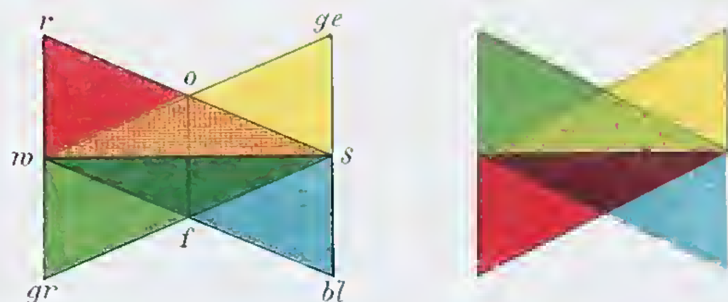
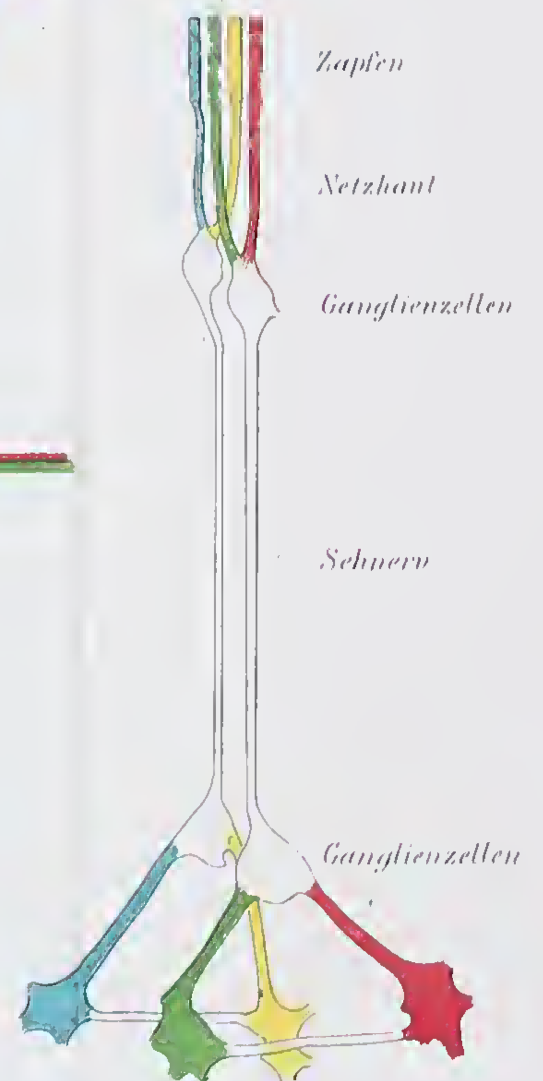


Fig. VII.



Fig. VIII.



W. Freyer

Lith. J. A. Hofmann, Würzburg